UNIVERSITE PIERRE & MARIE CURIE
LA SCIENCE A PARIS

THE UNIVERSITY OF NEW SOUTH WALES

THÈSE de DOCTORAT de l'UNIVERSITÉ PARIS 6 et de the UNIVERSITY of NEW SOUTH WALES

Spécialité : Acoustique, Traitement du Signal et Informatique Appliqués à la Musique

La clarinette et le clarinettiste : Influence du conduit vocal sur la production du son

Présentée par : **Claudia Fritz**

pour obtenir le double titre de Docteur de l'Université Paris 6 et de Doctor of Philosophy of the University of New South Wales

Soutenue le 15 Décembre 2004 devant le jury composé de :

M. René CAUSSE	Directeur de thèse (IRCAM, Paris)
M. Jean-Pierre DALMONT	Rapporteur (LAUM, Le Mans)
M. Benoît FABRE	Examinateur (LAM, Paris)
M. Avraham HIRSCHBERG	Rapporteur (Université d'Eindhoven)
M. Jean KERGOMARD	Directeur de thèse (LMA, Marseille)
M. Xavier PELORSON	Examinateur (ICP, Grenoble)
M. Joe WOLFE	Directeur de thèse (UNSW, Sydney)

à mes parents et mon Papy,

à Pierre-André Taillard,

Le son chaud de la clarinette, à la fois rude et velouté, éclatant dans l'aigu, sombre, mais riche, dans les notes graves du chalumeau, appelle l'idée du brun rouge, du rouge Van Dyck, du grenat.

A. Lavignac

Remerciements

Puisque j'ai réalisé ma thèse dans trois laboratoires et que j'ai eu de nombreux contacts en France comme à l'étranger, tant sur le plan scientifique que sur le plan musical, la liste des personnes à remercier est remarquablement longue... J'espère sincèrement n'oublier personne !

Commençons par Joe avec qui tout a commencé, il y a 5 ans de cela, lors de mon stage de maîtrise : merci à toi pour m'avoir donné le goût de la recherche et fait réellement découvrir l'acoustique musicale, et puis merci de m'avoir proposé, déjà à l'époque, de m'encadrer pour une thèse. Merci pour ta physique avec les mains, ton encadrement parfait (ni trop ni pas assez), ton enthousiasme incroyable et ton soutien continu (en particulier par téléphone ces derniers mois !). En plus du plaisir d'avoir travaillé avec toi ces trois années, quel enchantement furent les 14 mois passés à Sydney ! Ce fut une année très riche, aussi bien sur le plan scientifique que sur le plan humain. Thanks to The John Tann for his unbelievable availability when you need him. Thanks to Ra, Paul, Alex and Attila for their support and their good mood. Many thanks to Ken and Pritipal, from the workshop, who helped me a lot with the experiments, without any complaint. Thanks to David for having finished in a hurry his wonderful program without it I couldn't have done the measurements !

Continuons par l'IRCAM, mon laboratoire principal. Merci à René pour son enthousiasme, dès le début, pour cette thèse en cotutelle, son aide expérimentale et son soutien précieux durant la fin de thèse plutôt douloureuse (le gateau au chocolat tout frais après la deuxième nuit blanche fut un vrai régal !). Comment remercier André pour son soutien au quotidien, son expérience tant en linux qu'en simulation numérique et en manip, les nombreuses discussions scientifiques, et puis tout ce que j'oublie ? Un grand merci à Alain pour son savoir-faire incroyable (quelle petite merveille cette bouche artificielle !) et à Gérard pour son aide en électronique. Merci aux différents stagiaires qui sont venus peupler le labo 7 et l'ont égayé par leur bonne humeur. Une pensée plus particulière à ceux qui m'ont directement aidée comme Aude (merci pour ton assistance pour les dernières manips ainsi que pour ta relecture très attentive), “mon” Matthias qui m'a beaucoup apporté durant ses quatres de mois de stage et puis l”’autre” Matthias pour son programme *Imagina*. Et puis mille mercis à toute l'équipe système pour leur dévouement informatique. Merci à tous les autres pour leurs conseils, les discussions scientifiques ou non, leur aide administrative, et tout le reste !

Et terminons par mon troisième laboratoire, le LMA. Merci à Jean pour m'avoir été d'un très grand secours tout au long de cette thèse. J'aurais eu du mal à démarrer sans toi ... et d'ailleurs, j'aurais aussi eu du mal à finir sans toi ! Merci d'avoir réorienté le sujet sur la clarinette, c'est déjà suffisamment compliqué comme cela. Merci à Vincent et toute l'équipe.

Un grand merci à Snorre, avec qui j'ai beaucoup travaillé en première année, et à qui l'on doit ce merveilleux programme qu'est *Harmbal* !

Mais la liste ne s'arrête pas là. Je tiens en particulier à remercier toutes les personnes que j'ai rencontrées ou contactées et qui m'ont aidé sur le plan scientifique, de près ou de loin. Thanks to Brad Story for his help regarding the vocal tract simulation and the mapping. Danke Malte für deinen wissenschaftlichen Rat, for your really nice support at SMAC when I was not so convinced by what I was doing, et pour tous les bons moments passés ensemble en congrès. Un grand merci à l'équipe du Mans, Sébastien Ollivier, Joël Gilbert et surtout Jean-Pierre Dalmont, pour leur aide scientifique et le prêt du capteur. Thanks to Neville Fletcher for his fruitful comments and his interest. Merci à Franck Laloë pour ses commentaires intéressants et à Mico Hirschberg pour son idée des poumons. Thanks to Tim Leash and Gordon Troup for having provided me with dissertations or unpublished papers which were difficult to find. Merci à Shinji Maeda et Daniel Isabey pour m'avoir accordé un peu de leur temps pour me rencontrer.

Pour finir sur le plan scientifique, je tiens également à remercier les membres de mon jury d'avoir accepté de juger ces travaux, et plus particulièrement mes rapporteurs pour leurs commentaires fructueux.

Par ailleurs, cette thèse n'aurait pu exister sans les principaux intéressés, c'est-à-dire les clarinettistes. Mille mercis à Pierre-André qui est venu illuminer mes derniers mois de thèse grâce à ses remarques et ses expériences, son soutien et son intérêt, même si je me retrouvais souvent assommée le matin par ses très longs mails, parfois farfelus mais toujours très intéressants. Un très grand merci aussi à Debbie pour son devouement lors de la mise en place du système de mesure d'impédance. Merci aux clarinettistes parisiens comme Emmanuel, pour qui l'essence du propos réside finalement dans l'affirmation suivante "le /æ/ c'est joli, le /i/, c'est trop fort !", Massimo qui s'est libéré un certains nombres d'heures pour moi, Gunilla qui débarqua de Suède le jour où je désespérais de ne trouver aucun clarinettiste à l'Ircam, Jean-Baptiste, Cyrille, qui m'ont tous prété main forte pour les expériences à l'Ircam et Jean-Brice qui a courageusement accepté d'ingurgiter une pâte d'aspect tout à fait délicieux (bleu flash !) pour réaliser un moulage de sa cavité buccale. Et puis, bien sûr, many thanks à tous les cobayes de Sydney, Sneha, Stephanie, Lawrence, Don, Ian, Philip, CatherineS, Karl, Margery, Peter, Deanne, David, Juliet, Johanna.

Enfin, un grand merci à mes amis : tous les "ex-lyonnais" pour leur soutien permanent ; les aikidokas, français et australiens, pour m'avoir permis de me défouler sur eux, et vlan, kote gaeshi ! ; mes compagnons de cordée, d'ici et d'Oz ; les véliplanchistes et les surfeurs de downunder ; les musiciens et les mélomanes, avec une pensée particulière pour Olivier et sa précieuse relecture ; et puis tous les autres, qui ne rentrent pas dans ces catégories... Merci également à ma famille, et puis bien sûr merci à Pierrick pour m'avoir suivie dans cette extraordinaire aventure que fut l'Australie et pour avoir supporté mon "absence" les derniers mois.

Sommaire

Introduction

Ce document présente un travail de trois années, réalisé dans trois équipes : l'équipe Acoustique Instrumentale de l'IRCAM à Paris sous la direction de René Caussé, l'équipe Musical Acoustics de la School of Physics de l'UNSW à Sydney, sous la direction de Joe Wolfe et l'équipe Modélisation, Synthèse et Contrôle des Signaux Sonores et Musicaux au LMA à Marseille, sous la direction de Jean Kergomard. La collaboration entre ces trois équipes a permis ainsi d'allier connaissances théoriques et savoir-faire expérimental propres à chacune d'entre-elles.

Cette thèse a pour but d'apporter de nouvelles connaissances sur le rôle du conduit vocal du musicien dans le jeu de la clarinette. En effet, bien que les musiciens soient unanimes quant à son importance, les quelques travaux sur ce sujet le sont beaucoup moins. Ces travaux sont exposés dans une première partie, ainsi que les connaissances sur la clarinette qui nous seront utiles, en particulier le modèle dit élémentaire, que nous utiliserons dans un souci de simplification. Ce premier chapitre permet en particulier de mettre en évidence certaines lacunes que nous avons essayé de combler durant cette thèse.

Ainsi, l'impédance du conduit vocal des musiciens a été mesurée à plusieurs reprises mais les différentes méthodes présentent toutes des problèmes : la phase n'est pas forcément connue, le niveau de bruit est parfois très élevé et la reproductibilité ainsi que le réalisme de la mesure ne sont pas précisés. En particulier, comment les musiciens, durant la mesure, pouvaient-ils contrôler l'ouverture de leurs cordes vocales ? C'est dans le but de pallier ces problèmes que nous avons mis au point un nouveau système de mesure à l'UNSW, présenté au chapitre 2. Ce dispositif permet une mesure en quasi situation de jeu (le musicien ne peut pas véritablement jouer mais peut souffler) qui permet une bonne reproductibilité grâce au contrôle aisé de l'ouverture glottique. De plus, le niveau de bruit est relativement faible et la mesure donne accès à la fois à l'amplitude et à la phase de l'impédance. Les mesures ont été réalisées sur une vingtaine de clarinettistes australiens, de niveau avancé voire professionnel. Une partie de ces mesures est exposée en annexe E. Ces musiciens ont par ailleurs rempli un questionnaire (dont les résultats sont présentés en annexe D) sur leur utilisation du conduit vocal et le placement de leur langue. En fin de ce chapitre, nous comparons les mesures avec des modèles théoriques (modèle à constantes localisées et simulation numérique basse fréquence) afin de pouvoir ajuster le profil géométrique du conduit vocal pour retrouver les impédances mesurées.

Dans un troisième chapitre, nous présentons l'influence du conduit vocal sur le plan acoustique, d'un point de vue théorique. Après un rappel des équations du système lorsque la pression dans la bouche n'est plus considérée comme uniquement statique, nous effectuons un développement près du seuil, à trois harmoniques seulement, afin d'établir des relations ana-

lytiques donnant l'évolution de la fréquence de jeu en fonction de la configuration de conduit vocal. Malheureusement les prédictions sont très limitées en raison de la complexité du système : lorsqu'un grand nombre d'harmoniques est pris en compte, les résultats peuvent en effet être très différents. Nous nous appuyons donc ensuite sur des simulations numériques à grand nombre d'harmoniques, réalisées avec le programme d'équilibrage harmonique *Harmbal* (présenté de manière plus détaillé dans l'article mis en annexe C), pour étudier les effets d'un changement de configuration de conduit vocal par rapport à d'autres effets comme la prise en compte de l'amortissement de l'anche ou bien la dispersion dans la clarinette.

Ces simulations restent cependant élémentaires en raison du modèle utilisé. Ainsi, elles sont d'une part limitées au régime anche non battante, ce qui n'est pas le régime principal de jeu des musiciens[1]. D'autre part, la modélisation de l'anche est très succinte et ne reflète guère la réalité. Il est donc essentiel de réaliser une étude expérimentale pour aboutir à des résultats plus réalistes. Pour cette étude, présentée au chapitre 4, une bouche artificielle avec un conduit respiratoire a été mise en place à l'IRCAM. Elle permet en particulier de s'affranchir des mouvements de mâchoire inhérents à un changement de configuration de conduit vocal et entraînant un changement de la pression et de la position de la lèvre sur l'anche, ce qui, nous le savons, est la principale source de modification du son. L'étude est réalisée à la fois sur des tuyaux cylindriques en guise de corps de clarinette (le bec et le barillet son bien sûr conservés !) pour une comparaison plus facile avec notre modèle théorique, et sur une vraie clarinette pour une comparaison avec les remarques des clarinettistes. Il est important de signaler dès à présent que cette étude n'aurait pu être si approfondie sans l'aide précieuse du clarinettiste Pierre-André Taillard (en raison de son rôle primordial, sa biographie a été mise dans l'annexe G) qui non seulement a réalisé un réglage fin de la bouche artificielle permettant d'explorer tout le registre de la clarinette, du grave au suraigu, mais a également alimenté les discussions et les expérimentations grâce à ses connaissances approfondies du jeu de la clarinette, tant sur le plan musical que sur le plan scientifique. Ses expériences parallèles ont ainsi permis de mettre en lumière certains problèmes et de déterminer les points à investiguer plus en profondeur avec cette bouche artificielle pour tenter de comprendre à quel niveau et de quelle manière intervient véritablement le conduit vocal dans la production du son.

[1]Cependant, la nuance pianissimo/piano étant réalisable facilement par un clarinettiste, elle est souvent exigée par les compositeurs, tant pour des parties d'orchestre que pour des concertos. Cette nuance représente donc une partie importante de la gamme dynamique de la clarinette, contrairement au cas du hautbois par exemple.

Chapitre 1

Etat des connaissances

Ce chapitre nous permet de poser les bases de notre étude. Non seulement nous y faisons un état de l'art sur ce qui a déjà été réalisé par rapport au rôle du conduit vocal dans le jeu des instruments à vent (résultats, expérimentations) mais nous y abordons également les modèles et méthodes qui nous serviront dans la suite (modèle élémentaire de clarinette, modèle du conduit vocal, méthode de l'équilibrage harmonique, ...).

1.1 Le conduit respiratoire

1.1.1 Quelques définitions

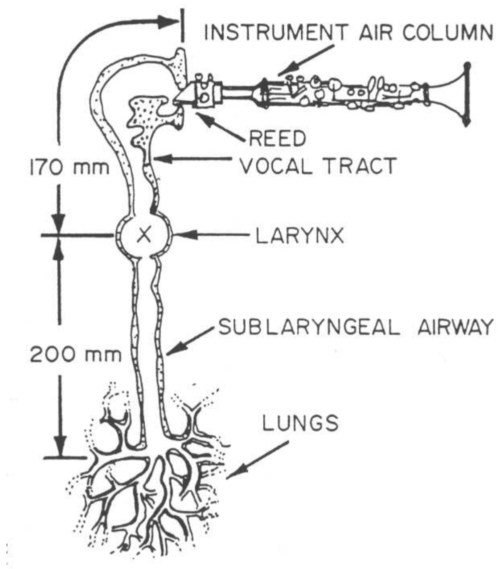


Fig. 1.1 – Clarinette et Clarinettiste, d'après Benade [11]

Le **conduit respiratoire** (CR) est l'ensemble du système respiratoire en amont de la

bouche, incluant les bronchioles et les poumons.

Le **conduit vocal** (CV) est la partie supérieure du conduit respiratoire, des cordes vocales aux lèvres, incluant donc le larynx et la gorge. C'est cette partie que le musicien peut contrôler et ajuster lorsqu'il joue, comme en parole. Sa longueur moyenne est de 17 cm.

Le conduit respiratoire inclut donc en plus du conduit vocal, la trachée et les poumons. C'est ce résonateur en entier qui intervient dans le jeu des musiciens. Cependant, comme seul le conduit vocal peut être contrôlé et que les musiciens non débutants ferment beaucoup leurs cordes vocales [71], le conduit vocal est en pratique le résonateur amont influent. Ceci explique pourquoi je parlerai le plus souvent de l'influence du conduit vocal plutôt que de celle du conduit respiratoire.

1.1.2 Sa géométrie

Etude physiologique en situation de jeu

Des études physiologiques ont permis d'examiner l'ouverture de la gorge et la position de la langue de musiciens, en situation de jeu, et de les corréler avec les paramètres musicaux (timbre, justesse, registre).

Anfinson [2] et Mooney [67] ont tous deux réalisé des radiographies du conduit vocal de clarinettistes pour différents registres. Leurs conclusions sont identiques : plus le registre est élevé, plus la langue s'abaisse en même temps qu'elle s'avance vers les dents, et plus l'ouverture de la gorge est grande. Ainsi, la langue est dans une position similaire à celle utilisée pour /u/ pour des sons graves alors que c'est plutôt la voyelle /a/ qui est utilisée pour les notes aiguës. Ceci est en contradiction avec l'enseignement de la clarinette, dans lequel la voyelle /a/ est préconisée pour le registre grave, et la voyelle /i/ pour l'aigu[1]. Mooney en conclut que cette dernière voyelle est évoquée plus pour la tension vers le haut des muscles des joues qu'elle implique que la position de la langue.

Clinch *et coll.* [16] ont examiné par fluoroscopie aux rayons X la forme du conduit vocal de joueurs de clarinette et saxophone soprano, et ont trouvé que les mouvements de la langue étaient semblables à ceux utilisés dans la phonation des voyelles, même s'il est clair que les fréquences de résonance du conduit vocal d'un musicien en train de jouer ne peuvent être égales à celles obtenues lorsque ce musicien parle, puisque les lèvres sont ouvertes et les cordes vocales fermées complètement. Leurs résultats contredisent les résultats de Mooney et Anfinson : même s'ils sont d'accord sur l'avancement de la langue lors de l'ascension des registres, ils n'observent un abaissement de la langue lorsque le son devient plus aigu qu'à l'intérieur du registre aigu, et non pas lors du passage du registre grave à l'aigu. Ainsi, les notes du registre aigu correspondent à une position de langue haute et archée, alors qu'elle est plate dans le registre grave, de sorte que les voyelles utilisées pour décrire la position de la langue est plutôt /a/ dans le grave et /i/ dans l'aigu.

[1] Cette idée, toujours largement admise chez les professeurs de clarinette français (cf D.2), a été exposée il y a 50 ans par Stauffer [87].

Fonctions d'aire dans le domaine de la parole

Les premières fonctions d'aires ont été évaluées par Fant [29] à partir des radiographies par rayons X d'un locuteur russe, prises au cours de la phonation. Ces radiographies ne constituent bien sûr qu'une représentation bidimensionnelle du CV.

Or la description la plus pertinente du conduit vocal est un réseau d'éléments finis en trois dimensions. Une banque de données pour la construction de tels réseaux a commencé à être réalisée par Story et Titze [90], pour différentes voyelles et consonnes, grâce à l'imagerie par résonance magnétique. Ces données sont cependant difficiles à obtenir en raison du temps et du coût lié au scan 3D de la tête.

Ce sont ces données qui nous serviront de base pour notre étude du conduit vocal au chapitre 2.

1.1.3 Son influence dans le jeu des instruments à vent

Cas de la clarinette

Mooney [67] a comparé les sons de clarinettistes avec ceux obtenus grâce à une bouche artificielle dont les paramètres étaient réglés en fonction des radiographies de ces mêmes clarinettistes, en situation de jeu. Ceci permettait de placer les dents inférieures, la lèvre et la langue dans la même position que pour le joueur réel et donc déterminer ainsi l'influence de chacun de ces paramètres indépendamment. Il a ainsi constaté l'indispensabilité de la langue, puisque sans elle, certains sons ne peuvent être obtenus avec la bouche artificielle. Sa position change suivant les registres, et elle affecte aussi bien le spectre (renforcement des quatrième et sixième harmoniques) que la hauteur du son.

Clinch *et coll.* [16] ont constaté que la qualité sonore dépend de la forme du conduit respiratoire. Ainsi, le conduit respiratoire doit être tel que, pour un son qualifié de beau, le spectre de pression dans la bouche soit très différent du spectre d'impédance, contrairement à la pression externe.

Benade [11] a montré le premier que l'impédance du conduit vocal est en série avec l'impédance de la clarinette, de sorte que ces deux résonateurs apparaissent dans la théorie comme symétriques. Cependant, le changement de l'une des impédances induit un effet du même côté de l'anche de sorte que les effets du conduit respiratoire ne sont pas immédiatement détectables. Il a observé que si les pics de l'impédance totale étaient harmoniques, l'oscillation était stabilisée, alors qu'un pic “mal placé” du conduit respiratoire pouvait provoquer des multiphoniques. Il a également réalisé des mesures de spectres, qui ont confirmé la subtilité de l'effet du conduit respiratoire : une augmentation de 40 dB du quatrième harmonique du signal de pression dans la bouche n'induit qu'une augmentation de 12 dB pour le signal de pression externe.

A l'opposé, et en contradiction avec les musiciens, Backus [8] considère que l'effet du conduit vocal est complètement négligeable. En tant que bassonniste, il n'a remarqué aucun effet quand il joue, et des essais délibérés de modification de la forme de sa bouche n'ont mené à aucune

conclusion. Il a également réalisé une expérience pour prouver ce qu'il avance : il a branché une clarinette, dont l'anche était contrainte par un dispositif adéquat, sur un aspirateur. Elle fonctionnait ainsi "toute seule" et les musiciens n'avaient qu'à poser leurs lèvres autour du bec sans se préoccuper de souffler et sans changer la contrainte sur l'anche. Backus n'a observé aucun changement lorsque ces musiciens faisaient varier la forme de leur bouche. Il a ensuite remplacé les musiciens par des tubes de différentes longueurs et n'a observé un changement notable que pour des impédances très grandes, bien plus grandes que celles qu'il a mesurées pour des conduits vocaux humains (cf partie 1.1.4).

Sommerfeldt et Strong [83] ont réalisé une simulation numérique du jeu de la clarinette en tenant compte du conduit vocal (cf section 1.1.4). Ils ont observé que pour la plupart des voyelles utilisées, le spectre de pression dans la bouche pouvait varier notablement, au contraire du spectre de pression dans la clarinette. Ils en ont ainsi déduit que l'anche découple fortement la clarinette du conduit respiratoire, et que donc l'influence de celui-ci est très réduite. Ils ont cependant remarqué que la configuration /i/ avec une résonance renforcée à 900 Hz pouvait produire un saut de registre lorsque 6 clés de la clarinette étaient ouvertes, sans avoir à utiliser la clé de registre[1]. En fait, pour cette note particulière, le troisième harmonique prédomine et l'emporte sur le fondamental. L'étude a cependant été limitée au registre de chalumeau[1] et d'autres effets peuvent êtres attendus dans les registres supérieurs.

Hoekje [50] considère, au vu de ses mesures d'impédance (cf section 1.1.4), que le musicien est capable de changer la principale résonance de son conduit vocal, au niveau de la fréquence et de l'amplitude. Il a également réalisé une simulation pour montrer l'influence du conduit vocal. Il a placé deux résonateurs de part et d'autre d'une anche, l'un constant, de résonance principale à 175 Hz, d'impédance Z_u (u pour "upstream"), l'autre d'impédance Z_d (d pour "downstream") de résonance d'amplitude variable, à 350 Hz. Il a regardé l'évolution de la pression de part et d'autre de l'anche pour différentes valeurs de cette amplitude et pour différentes pressions statiques dans la bouche. Il a ainsi remarqué que l'amplitude du deuxième harmonique de pression dans le résonateur aval (P_{2d}) augmente avec Z_d alors qu'au contraire P_{2u} dans le résonateur amont diminue, et sa valeur est bien plus faible. Il explique ceci par le fait que P_{2u} est proportionnel à u_2 puisque Z_{2u} est constant. Or $P_2 = P_{2u} - P_{2d}$ est fixé à sa limite supérieure par la non-linéarité de l'anche et donc si $Z_2 = Z_{2u} + Z_{2d}$ augmente (puisque Z_{2d} augmente), u_2 diminue nécessairement. Les mesures montrent d'autre part un comportement linéaire pour des faibles valeurs de Z_{2d} et un comportement limite pour des valeurs élevées. D'autre part, Hoekje parle d'une légère variation de la composante fondamentale de pression ainsi que de la fréquence de jeu, mais il ne précise pas davantage. Les résultats sont bien sûrs réversibles puisque le dispositif est symétrique.

Johnston, Troup et Clinch [54] prédisent *a priori* quelques influences du conduit vocal, d'après des généralités bien connues sur la clarinette (fréquence de jeu légèrement inférieure au fondamental de la clarinette, jeu facilité si les résonances sont harmoniques,...) :

- si le pic de résonance de l'impédance du conduit vocal est inférieur en fréquence et plus grand en amplitude que le pic fondamental de la clarinette, alors la fréquence de jeu sera égale à la fréquence de résonance du conduit vocal, ce qui correspond à l'effet de pitch bend.

[1]Le vocabulaire relatif à la clarinette est défini dans l'annexe G. Les mots correspondants sont soulignés lorsqu'ils apparaissent pour la première fois dans le texte.

– si le pic du conduit vocal vient renforcer le troisième harmonique, un saut de registre peut avoir lieu (effet de bugling).
– si le conduit vocal provoque un mauvais alignement des pics de résonance du système total par rapport à la série harmonique, des multiphoniques peuvent se produire.
– le glissando pourrait correspondre à une situation où le conduit vocal régit l'oscillation sur une large bande de fréquence car son impédance est plus grande que celle de la clarinette, diminuée par exemple par une fermeture partielle des clés, qui engendre des pertes.

Wilson [94] a mesuré l'impédance du conduit vocal en situation de jeu et a tiré différentes conclusions - plutôt qualitatives comme pour la majorité des auteurs précités - suite à l'observation de ces spectres d'impédance. La mesure d'impédance au cours d'extraits musicaux lui a permis de conclure que pour la plupart des notes, le conduit respiratoire est accordé sur le premier ou le deuxième partiel de la clarinette. C'est en particulier crucial pour le registre altissimo car cela permet la stabilisation de l'oscillation. 22 % des notes sont jouées sans accord particulier du conduit vocal et des notes de même hauteur peuvent correspondre à des configurations de conduit respiratoire notablement différentes, ce qu'elle explique par la différence de contexte musical. Certains musiciens considèrent qu'il vaut mieux jouer avec la gorge ouverte, sans donner pour autant plus de précision (sont-ce les cordes vocales qui doivent être ouvertes ou bien l'arrière de la bouche ?), et Wilson a mesuré des impédances radicalement différentes entre une situation "gorge ouverte" et une situation "gorge fermée" sans cependant arriver à expliquer, au vu des courbes d'impédance, pourquoi telle configuration était préférable à l'autre. Elle a aussi observé un petit rôle du conduit respiratoire lors du changement de registre du chalumeau au clairon, sans utiliser la clé de registre. Par ailleurs, elle a mis en évidence l'importance du conduit respiratoire dans la production de multiphoniques, pour lesquels il faut que les résonances du conduit soient des combinaisons linéaires des fréquences des notes jouées simultanément, ainsi que dans l'effet de pitch bend, où l'impédance du conduit respiratoire devient plus grande que celle de la clarinette et régit de ce fait l'oscillation.

Cas des autres instruments

La liste ne se veut pas exhaustive puisque ces instruments sortent du cadre de cette thèse, mais elle permet de donner quelques pistes.

Elliot et Bowsher [26] ont examiné, en marge de leur étude principale, l'influence du conduit vocal sur les cuivres. Ils ont les premiers utilisé la continuité du flux acoustique à travers l'anche (ici lippale) pour remarquer que le rapport d'impédances du conduit vocal et de l'instrument était égal au rapport de pression dans la bouche de l'instrumentiste et dans l'instrument, et donc en déduire l'impédance du conduit vocal à partir de la mesure des trois autres grandeurs. Ils ont ainsi constaté que si l'impédance du conduit vocal est une fraction non négligeable de celle de l'instrument, l'intonation en est affectée. Ils ont aussi montré théoriquement que c'est l'utilisation d'une forme correcte du conduit vocal qui permet aux musiciens de faire des "buzz" avec leur seule embouchure (sans le corps de l'instrument).

Des études ont également été faites sur l'harmonica afin de voir l'influence de la cavité buccale sur l'auto-oscillation des valves et en particulier leurs stabilité : c'est l'introduction

d'un simple volume en amont de l'harmonica qui permet de mettre en évidence des termes rendant possible l'instabilité des anches amont ouvrantes. Des modèles complets (Johnston [52], Bahnson [9] et Millot dans sa thèse de doctorat [66]) de l'harmonica diatonique ont été ainsi créés pour expliquer l'importance des variations de configuration buccale dans l'obtention de certains modes, importance visualisée par radiographie par Levy [61].

Le didgeridoo est un autre instrument à vent où l'influence du conduit vocal ne laisse place à aucune controverse en raison de la multitude de sons joués par rapport à la facture très simple de l'instrument, qui peut se résumer grossièrement à un tube, plus ou moins cylindrique, de diamètre assez variable. Une étude de Fletcher *et coll.* [33] met en relation la forme du conduit vocal réalisée par IRM, le spectre d'impédance de ce conduit et le spectre du son résultant pour deux sons bien distincts : le premier, simple, sans inflexion, correspond à un conduit vocal assez uniforme, dont le module d'impédance ne présente pas de pics nets ; le second, au caractère nasal prononcé, correspond à un conduit vocal réduit au niveau de la bouche (constriction palatale) ce qui induit trois pics marqués dans le spectre d'impédance. Ces pics ne se retrouvent en revanche pas dans le spectre de pression du son correspondant, même si ce spectre présente des formants non discernables dans le spectre de l'autre son.

1.1.4 Son impédance acoustique

Les études du conduit vocal suivent les traces des études effectuées dans le domaine de la parole (Flanagan [32] et Fant [29]), dans lesquelles le conduit vocal est considéré comme un résonateur acoustique linéaire, de sorte que son impédance d'entrée en est une grandeur caractéristique.

<u>Mesures</u>

Mesures d'impédance acoustique

Il existe quatre techniques principales de mesure d'impédance d'entrée d'un résonateur.

1. Le moyen le plus direct pour obtenir l'impédance est de mesurer simultanément la pression et le débit acoustique à l'entrée du résonateur. Cependant, alors que la mesure d'une

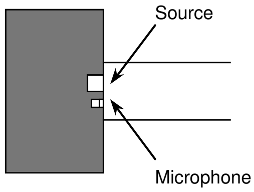


FIG. 1.2 – Méthode directe

pression est facile à réaliser à l'aide d'un microphone, celle d'un débit est beaucoup moins aisée. Cette dernière peut se faire par la technique du fil chaud utilisée par Pratt, Elliot et Bowsher [77] mais ce procédé est délicat à mettre en oeuvre.

Il est donc plus simple d'utiliser une source de débit connue ou dont le débit est directement proportionnel à une pression, mesurable par un microphone. C'est ce qui est utilisé dans les deux méthodes suivantes.

2. Un haut-parleur, dont la partie arrière est cloisonnée, fournit dans la cavité ainsi constituée, à basse fréquence, une pression uniforme et proportionnelle au débit acoustique délivré par le haut-parleur. Cependant, la plage de fonctionnement est limitée aux fréquences inférieures à la première fréquence de résonance de la cavité.

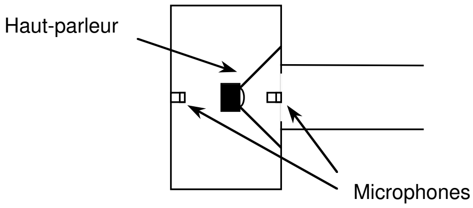


Fig. 1.3 – Méthode du haut-parleur cloisonné

3. Un haut-parleur relié à un capillaire, constituant une charge acoustique de très grande impédance, forme une source de courant acoustique quasi parfaite. Le microphone en

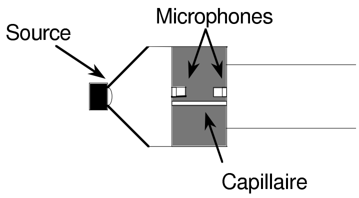


Fig. 1.4 – Méthode du “ capillaire ”

amont du capillaire mesure une pression proportionnelle au flux acoustique à la sortie du capillaire. Cependant, à cause de la forte atténuation du capillaire, le niveau de pression à la sortie du haut-parleur doit être élevé de sorte que les vibrations induites peuvent perturber la mesure. Il est donc souhaitable de construire un montage de manière à dissocier mécaniquement l'instrument de la source.

4. La quatrième méthode, dite “ à deux microphones ”, est bien connue pour la mesure d'impédance de matériaux absorbants. Comme la vitesse des particules est localement proportionnelle au gradient de pression, la paire de microphones permet de déduire le débit acoustique. Elle constitue un capteur mesurant l'impédance au niveau de la section située au milieu des deux microphones.

De plus amples détails sont fournis dans le travail de revue de J.P. Dalmont [18].

Mesures de l'impédance du CR pour l'analyse de son effet sur la clarinette

La mesure la plus couramment utilisée pour le conduit vocal est celle dite du capillaire, avec un signal source à large bande (50-5000Hz) mais les dispositifs utilisés dans le domaine de la

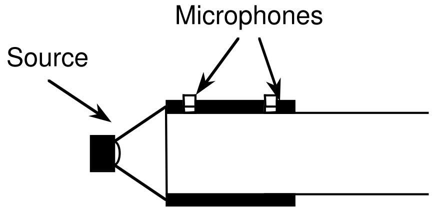


Fig. 1.5 – Méthode “ à deux microphones ”

parole (par exemple [80], [85], [27], [60], sans être exhaustif), souvent pour déterminer la forme du conduit vocal, ne peuvent malheureusement pas être utilisés tels quels car la mesure doit correspondre à une situation de jeu, ce qui complique le placement de la tête de mesure. Les mesures n'ont pour l'instant jamais été obtenues en situation de jeu réel car l'écoulement dans l'embouchure perturberait trop la mesure. Certaines mesures ont cependant été réalisées en situation de mime, c'est-à-dire avec au moins un bec de clarinette dans la bouche, mais ce n'est pas le cas de toutes. D'autre part, la phase est rarement donnée. Enfin, l'ouverture de la glotte, qui joue un rôle prépondérant car les mesures diffèrent complètement si la glotte est ouverte (mesure de l'impédance du conduit respiratoire entier) ou fermée (mesure de l'impédance du conduit vocal, proche d'une situation de parole), est rarement précisée de sorte que la disparité des mesures peut provenir de cet effet.

Benade [11] a réalisé des mesures avec une méthode proche de celle du capillaire : la source utilisée a directement une haute impédance, sans avoir besoin de rajouter un capillaire. La source et le microphone sont cependant montés dans un tube de 20 mm de diamètre, sur lequel le musicien vient placer ses dents : la bouche est donc beaucoup plus ouverte qu'avec un bec de clarinette, de sorte que l'amplitude de l'impédance est certainement sous-estimée. Les spectres présentent en général trois pics, le premier vers 200 Hz, le deuxième entre 800 et 900 et le dernier entre 1100 et 1500 Hz, du moins pour les trois voyelles présentées, [ah], [eh] et [ih]. L'amplitude du premier pic est assez faible, les deux autres sont bien plus élevées (entre 10 et 30 dB au-dessus). Les spectres présentent tous une caractéristique commune : il s'agit de pics et creux superposés sur une large bosse, centrée vers 1000 Hz, qui laisse penser à une constriction (cf le paragraphe suivant sur les simulations numériques).

Backus [8] a réalisé ses mesures par la méthode du capillaire, avec le dispositif qui lui a permis de faire ses mesures d'impédance de la clarinette [7]. L'adaptateur cylindrique dans lequel venait s'encastrer le tube de référence sert ici de reposoir pour les lèvres. Sa taille n'est pas précisée, mais comme le tube de référence a un diamètre interne de 1.6 cm, son diamètre externe doit être de l'ordre de 2cm, de sorte que la bouche est, comme dans le dispositif de Benade, plus ouverte qu'en situation de jeu. Backus ne donne aucune courbe d'impédance et déclare seulement que ses mesures ne sont pas reproductibles : les pics sont aléatoires et de toute manière d'amplitude inférieure à 5 MPa.s.m^{-3}, soit bien inférieurs aux pics d'impédance de la clarinette.

Hoekje [50] a utilisé à peu près le même dispositif sauf que la mesure se fait par l'intermédiaire d'un petit tuyau, qui relie la bouche au dispositif de mesure, de longueur 1.8 cm et de rayon 2.3mm, ce qui correspond mieux à une situation de jeu. Les mesures sont ensuite

corrigées pour supprimer l'effet de ce petit tuyau. Ses mesures donnent un petit pic à basse fréquence vers 200 Hz,inférieur à 5 MPa.s.m^{-3}, pour les voyelles /ɒ/ (comme dans "wash" en anglais), /i/ ("heed") et /ɪ/ ("hid"). Une autre résonance est obtenue à plus haute fréquence, et d'amplitude plus grande : 8 MPa.s.m^{-3} à 870 Hz pour le /ɒ/, 30 MPa.s.m^{-3} à 1000 Hz pour le /i/ et 25 MPa.s.m^{-3} 700 Hz pour le /ɪ/.

Wilson [94] a réalisé deux types de mesures. La première mesure est directe par la méthode du capillaire, et la source et le microphone sont placés dans une petite pièce de mousse à l'intérieur du bec de clarinette pour reconstituer une situation de jeu. La calibration se fait avec des tubes cylindriques calibrés et fermés à une extrémité. Le signal large bande est obtenu par un balayage en fréquence. Comme il était difficile pour les musiciens de garder une configuration de conduit vocal donnée, la mesure était réalisée sur un cycle de balayage seulement, de sorte que la non possibilité de moyennage implique des mesures très bruitées. C'est cependant la seule étude qui donne le module et la phase de l'impédance. Des pics d'impédance sont essentiellement obtenus dans la bande 200-250 Hz, dans la bande 400-1100 Hz et parfois entre 2000 et 3000 Hz. Les références ne sont pas données par rapport à des voyelles mais par rapport à des notes et des registres pour bien relier la configuration du conduit vocal à la technique musicale. Wilson explique la différence entre ses mesures et celles de Benade et Hoekje par le fait que la gorge des musiciens est ouverte en situation de jeu. Mais est-ce bien sûr que la sensation de gorge ouverte implique que la glotte soit ouverte alors que Wilson déclare elle-même l'impossibilité des musiciens à expliquer plus précisément cette sensation ? Son autre série de mesures a été réalisée par une méthode indirecte, liée à la continuité du flux de la bouche à l'entrée de la clarinette. Les deux équations suivantes sont vérifiées (les indices m et c désignant respectivement la bouche et la clarinette) :

$$P_m = - Z_m U \quad (1.1)$$
$$P_c = Z_c U \quad (1.2)$$

de sorte que, Z_c étant connue par des mesures préalables (plus fiables que celles du conduit vocal), et P_m et P_c pouvant être mesurées grâce à des microphones, Z_m s'en déduit aisément :

$$Z_m = -\frac{P_m}{P_c} Z_c \quad (1.3)$$

L'inconvénient de cette méthode est de n'obtenir des mesures fiables que pour les fréquences harmoniques de la note jouée car, pour les autres fréquences, le niveau de bruit est trop important puisque les spectres de pression sont faibles. L'avantage, en revanche, est que cette mesure peut être effectuée lors de l'exécution d'un extrait musical. Les deux méthodes donnent cependant rarement les mêmes résultats pour les fréquences harmoniques.

Simulations numériques

Benade [11], pour analyser ses mesures, a modélisé le conduit respiratoire par 3 tubes, le diamètre de celui du milieu étant bien inférieur à celui des deux autres afin de représenter la constriction palatale. La longueur des trois tubes assemblés est égale à la longueur totale

du conduit respiratoire et la terminaison est ouverte, ce qui est contraire à l'effet totalement dissipatif des poumons.

Hoekje [50] a utilisé pour la simulation du conduit respiratoire les fonctions d'aires de Fant et a pris en compte les parois molles par un amortissement dix fois supérieur à celui de parois rigides, comme le propose Ishizaka [51]. Pour la glotte, il a choisi une ouverture moyenne, de 0.6 cm^2, pour tenir compte de la disparité des joueurs. Avec cette simulation, il a obtenu un premier pic entre 150 et 180 Hz, d'amplitude entre 4 et 6 $MPa.s.m^{-3}$ pour les trois voyelles /ɑ/, /e/ et /ɨ/. Le deuxième pic varie en revanche : il est très faible et placé vers 2000 Hz pour le /ɑ/, il est de 7.5 $MPa.s.m^{-3}$ pour le /e/, placé à 1030 Hz et enfin il est double pour le /ɨ/ : 14 $MPa.s.m^{-3}$ à 680 et 820 Hz. Les amplitudes calculées sont donc bien inférieures à celles qu'il a mesurées. Il ne s'agit cependant pas des mêmes voyelles, ce qui est un peu regrettable.

Sommerfeldt et Strong [83] ont considéré le conduit respiratoire comme un ensemble de 16 tubes concaténés, de longueur 2.5 cm chacun. Sept de ces tubes représentaient le conduit vocal, et leur section était variable pour obtenir différentes configurations. La trachée, de longueur 12.5 cm et les bronches de longueur 5 cm, étaient constituées de tubes uniformes, leurs diamètres étant déterminés d'après les valeurs d'Ishizaka et al [51]. Les poumons sont considérés comme une résistance pure, de 0.4 $MPa.s.m^{-3}$ [51]. Pour l'obtention de résultats numériques, Sommerfeldt et Strong ont utilisé le circuit électrique équivalent. Les parois souples du conduit respiratoire ont ainsi été assimilées à un circuit RLC, dont les valeurs moyennes ont été obtenues d'après Ishizaka [51]. Les trente configurations de conduit vocal testées donnent une impédance dont le module est inférieur à 10 $MPa.s.m^{-3}$ sauf pour les configurations /i/ et /ɪ/. Trois études complètes ont été menées pour la configuration /ɑ/, dont le pic est inférieur à 5 $MPa.s.m^{-3}$, et pour deux configurations /i/, l'une avec une résonance d'amplitude 17 $MPa.s.m^{-3}$, l'autre de 30 $MPa.s.m^{-3}$.

Pour vérifier certaines de leurs prédictions, Johnston, Clinch et Troup [54] se sont intéressés à un conduit vocal de résonance unique, variable en fréquence et en amplitude, en considérant l'approche correcte puisque d'après eux, le musicien ne peut d'ailleurs contrôler qu'une résonance, généralement la plus basse en fréquence. Ils ont fixé la résonance fondamentale de la clarinette à 288.3 Hz et ont fait varier celle du conduit vocal entre 200 et 1200 Hz. L'autre grandeur variable est le rapport entre l'amplitude du pic de résonance du conduit vocal et celle du fondamental de la clarinette. Si ce rapport est supérieur à 5, l'oscillation est basée sur le conduit vocal. Si en revanche il est inférieur à 0.2, c'est la clarinette qui régit l'oscillation. Pour des rapports intermédiaires, ils ont pu constaté l'effet de pitch bend et l'effet de bugling. Les variations de la fréquence de jeu sont consignées dans la figure 1.6, extraites de leur article [54].
Ils ne précisent cependant pas quel type d'impédance ils ont utilisé pour le conduit vocal, et en particulier ce que vaut le facteur de qualité. La réponse est donnée dans un article qu'ils n'ont pas publié [53] et que Troup m'a fait parvenir pour répondre à mes questions. Dans cet article, ils expliquent un peu plus le choix d'un seul pic de résonance : les résultats précédents de Clinch montrent que la cavité buccale est grande et le larynx fermé pour les notes graves, et que le contraire se produit pour les notes aiguës, ce qui implique que la fréquence de résonance du conduit vocal augmente simultanément avec la fréquence de jeu. Ils ont ainsi émis l'idée que le musicien accorde la fréquence du conduit vocal à la note jouée, ce qui permet de se limiter à une seule résonance. D'autre part, le fait de modéliser le conduit vocal a priori de

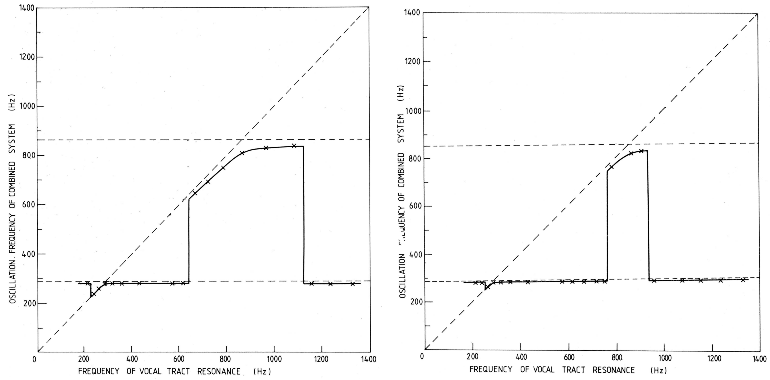


Fig. 1.6 – Fréquence d'oscillation en fonction de la fréquence de résonance du conduit vocal, pour un rapport d'amplitude de 0.7 à gauche et 0.5 à droite. Les lignes pointillées horizontales correspondent au fondamental et au troisième harmonique de la clarinette, la ligne diagonale correspond à la résonance du conduit vocal (figure extraite de [54]).

toute considération géométrique et physiologique permet de s'affranchir de données peu fiables, en particulier celles qui concernent le domaine sous-glottal. L'inconvénient est qu'aucun lien ne pourra ensuite être fait avec un changement de géométrie. D'autre part, ils donnent l'impédance utilisée : il s'agit de l'impédance d'un tube cylindrique filtré à basse fréquence pour ne garder que la première résonance. Il s'agit donc d'un cas assez particulier, ce qui nuit à la généralité du problème.

Après nous être concentrés sur le conduit vocal, intéressons-nous maintenant à l'instrument lui-même, la clarinette.

1.2 La clarinette

Nous nous limiterons ici à l'étude de la clarinette sans conduit vocal, c'est-à-dire en supposant que la pression dans la bouche est constante.

Une synthèse complète a été réalisée par Gazengel dans sa thèse [37] de sorte que je ne rappellerai ici que les points qui nous intéressent, en particulier le modèle élémentaire.

1.2.1 L'anche

L'anche est une lame de roseau ou en matériau composite dont la géométrie est complexe et dont les propriétés mécaniques sont inhomogènes et anisotropes. Son mouvement est limité par la table du bec. Lorsque l'anche est en contact avec la totalité de la table, le débit entrant est nul.

Pour déterminer le déplacement vertical de l'anche, certains auteurs modélisent l'anche

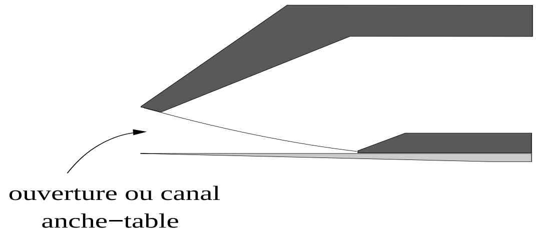


FIG. 1.7 – Le bec : anche et table

comme une poutre en flexion [88, 83]. D'autres auteurs se sont concentrés sur les modes de torsion [23, 28, 76]. Nous nous limiterons ici au modèle le plus simple consistant en un oscillateur à un degré de liberté, dont le mouvement est équivalent au mouvement de l'extrémité de l'anche [95], et dont les paramètres sont constants. La validité d'une raideur constante a en effet été prouvée expérimentalement par Ollivier [74] dans le régime anche non battante. Le déplacement de l'anche y ($y = 0$ quand l'anche est au repos et $y = -H$ quand l'anche est plaquée, cf figure C.1) vérifie donc l'équation du second degré suivante :

$$\frac{\mathrm{d}^2 y(t)}{\mathrm{d}\,t^2} + g_r \frac{\mathrm{d}\,y(t)}{\mathrm{d}\,t} + \omega_r^2 y(t) = \frac{1}{\mu_r}(p_c(t) - P_{m0}), \tag{1.4}$$

où μ_r est la masse surfacique de l'anche, ω_r sa pulsation de résonance et g_r son amortissement. $p_c(t)$ est la pression dans le bec de clarinette et p_{m0} la pression statique dans la bouche, supposée constante.

Lorsque la fréquence propre de l'oscillateur équivalent à l'anche est très supérieure aux fréquences de jeu du registre fondamental, alors la modélisation de l'anche peut se réduire à un ressort, de raideur k_r. Dans ce cas, l'équation (1.4) se simplifie en :

$$y(t) = \frac{p_c(t) - P_{m0}}{k_r} \tag{1.5}$$

La différence entre les deux modèles est étudiée dans [35] mis en annexe.

1.2.2 Le résonateur

Dans l'hypothèse de pressions acoustiques de faibles amplitudes (par rapport à la pression atmosphérique) dans le résonateur, le comportement acoustique de celui-ci peut être considéré comme linéaire. Il est alors caractérisé par son impédance d'entrée, c'est-à-dire sa fonction de transfert entre le débit entrant et la pression dans le bec :

$$Z_c(\omega) = \frac{P_c(\omega)}{U(\omega)} \tag{1.6}$$

où les lettre majuscules désignent les grandeurs oscillantes (composante statique non incluse) dans le domaine fréquentiel.

Pour des résonateurs de forme simple (comme des tuyaux cylindriques), l'impédance est connue analytiquement. Pour les formes plus complexes comme une réelle clarinette, l'impédance est soit mesurée ([15, 39, 19], une importante banque de données pour la clarinette étant disponible sur [96]) soit calculée numériquement [79, 56, 55].

Même si nous nous nous limiterons ici au cas d'un résonateur linéaire, il faut garder à l'esprit qu'un certain nombre d'effets non-linéaires peuvent être présents. Des études récentes se sont intéressées à ces effets, qu'ils soient localisés [21, 3, 4, 75] ou liés à la propagation [48, 70].

1.2.3 La caractéristique non linéaire

La non-linéarité essentielle de la clarinette réside dans le comportement du jet entrant ou sortant du canal anche-table. Une discussion des phénomènes physiques mis en jeu peut être lue dans [46]. La modélisation du système excitateur est généralement réalisée dans le cadre d'une théorie quasi-stationnaire en ce qui concerne l'écoulement. Ce système excitateur est par ailleurs supposé de dimensions petites devant la longueur d'onde et localisé à la sortie du canal anche-table. La source acoustique ainsi constituée est caractérisée par une relation non-linéaire entre le débit et la différence de pression de part et d'autre de l'anche. Une relation a d'abord été proposée de manière empirique par Backus [6], puis les travaux de Hirschberg *et coll.* [47] et Gilbert [40] ont conduit à l'adoption du modèle élémentaire suivant, déduit de la relation de Bernoulli en régime stationnaire :

$$u = w(H + y)\sqrt{\frac{2|p_c - P_{m0}|}{\rho}}\,\mathrm{sgn}(p_c - P_{m0}) \tag{1.7}$$

où u est le débit entrant, w la largeur effective de l'anche (qui tient compte de la contraction ou de l'élargissement du jet) et ρ la masse volumique de l'air. Nous rappelons que y est le déplacement de l'anche (vérifiant (1.4) ou (1.5)) et H l'ouverture du canal lorsque $P_{m0} = 0$.

Ceci est valable si l'anche n'est pas plaquée, sinon, $u = 0$. En régime statique, la condition de placage est donnée par le fait que la pression dans la bouche doit rester inférieure à une certaine pression, dite pression de plaquage, P_M.

1.2.4 Adimensionnement des équations

Il peut être commode d'exprimer les différentes équations à l'aide de grandeurs adimensionnées comme cela a été fait par Kergomard [57]. Les détails sont donnés à la section C.1.2. Nous ne rappellerons ici que les principales équations :

$$\begin{aligned} M\ddot{\tilde{y}} + R\dot{\tilde{y}} + K\tilde{y} &= \tilde{p}_c - \gamma \quad \text{ou} \quad \tilde{y} = \tilde{p}_c - \gamma && (1.8)\\ \tilde{u}(\tilde{p}, \tilde{y}) &= \zeta(1 + \tilde{y})\sqrt{|\gamma - \tilde{p}|}\,\mathrm{sgn}(\gamma - \tilde{p}) && (1.9)\\ \tilde{P}_c(\omega) &= \tilde{Z}_c(\omega)\tilde{U}(\omega) && (1.10) \end{aligned}$$

où le tilde désigne les grandeurs adimensionnées (la pression par la pression de plaquage P_M, l'impédance par l'impédance caractéristique du résonateur Z_0 et le débit par P_M/Z_0).

ζ est un paramètre d'embouchure, lié au débit maximal pouvant entrer dans le bec, et γ correspond à la pression d'alimentation adimensionnée :

$$\zeta = Z_0 w H \sqrt{\frac{2}{\rho P_M}} \tag{1.11}$$

$$\gamma = \frac{P_{m0}}{P_M} \tag{1.12}$$

Nous disposons donc de trois équations, (1.8), (1.9) et(1.10), à trois inconnues, p, u et y, qu'il est donc possible de résoudre, du moins numériquement. Nous présentons ainsi au paragraphe suivant la méthode de résolution numérique que nous utiliserons dans la suite de cette thèse : l'équilibrage harmonique.

1.3 Résolution numérique : La méthode d'équilibrage harmonique

La méthode d'équilibrage harmonique est une méthode générale permettant de trouver des solutions périodiques d'un système non-linéaire oscillant. Elle a été appliquée pour la première fois par Gilbert et Kergomard au cas de la clarinette en 1989 [42]. Dans cette référence, une description complète peut y être trouvée de sorte que nous ne présentons ici que succintement la méthode.

Nous supposons le système gouverné par deux équations reliant les deux variables p et u (ce que l'on peut obtenir en combinant (1.8) avec (1.9)). L'une des équations est linéaire, dans le domaine fréquentiel, et l'autre est non-linéaire, dans le domaine temporel. La particularité de cette méthode de résolution est de calculer ce qui appartient au domaine temporel dans le domaine temporel, et ce qui appartient au domaine fréquentiel, dans le domaine fréquentiel.

Partant d'un vecteur initial P dans le domaine fréquentiel, dont les composantes sont la fréquence f et les parties réelles et imaginaires des harmoniques de la solution supposée, nous calculons un nouveau vecteur F de la manière suivante : nous utilisons la transformée de Fourier inverse $p(t)$ de P pour trouver, avec l'équation non-linéaire, $u(t)$. Puis, en repassant dans le domaine fréquentiel, nous obtenons un nouveau vecteur de pression F par $F = ZU$, qui doit être égal à P si P est la solution du système.

Si tel n'est pas le cas, les itérations sont réalisées par la méthode de Newton-Raphson pour converger vers le zéro de la fonction $G = F - P$: le jacobien de cette fonction est calculé au point P considéré, un nouveau vecteur P' en est déduit, supposé s'approcher de la solution, puis F' est calculé et $G' = F' - P'$ est comparé à $G = F - P$. Sans détailler plus les conditions permettant à l'itération de se poursuivre ou non, nous nous contenterons de savoir que lorsque la différence G est suffisamment petite, la solution est atteinte.

Les avantages d'une telle méthode, par rapport à une simulation temporelle [83, 38] sont de déterminer aisément la fréquence de jeu ainsi que l'évolution de la solution (fréquence et spectre) en fonction des variations d'un paramètre (comme par exemple γ ou ζ).

Cette méthode a été implémentée par Snorre Farner dans le programme *Harmbal* [30], décrit en annexe C, et que nous utiliserons dans toutes les simulations numériques de cette thèse.

1.4 Expérimentation : Bouche artificielle

Toutes les bouches artificielles qui ont été réalisées jusqu'à présent pour instrument à anche disposent d'une large cavité buccale pour essentiellement deux raisons. D'une part, l'étanchéité peut ainsi être réalisée, pour la clarinette, autour du barillet (cylindrique), ce qui est évidemment beaucoup plus facile que de la faire au niveau des lèvres. De plus, ceci permet d'avoir un dispositif à parois planes (il s'agit toujours d'une boîte parallélépipédique) indispensables aux mesures optiques pour la détermination du déplacement de l'anche.

Voici, de manière succinte, un rappel sur différentes bouches qui ont été construites de part le monde.

La première bouche remonte, à notre connaissance, à 1941, et a été réalisée par McGinnis et Gallagher dans le but d'étudier les modes de vibration de l'anche [64] par une étude stroboscopique. Un patin en caoutchouc simulait la lèvre inférieure et la pression de ce patin sur l'anche était ajustée par une vis, pour simuler la dent.

Vient ensuite la bouche de Backus [5], réalisée dans les années 60, dans une perspective similaire à la précédente : l'étude de l'anche. Son ouverture au cours du temps a été ainsi mesurée grâce à une méthode photoélectrique qui permettait de déterminer la quantité de lumière traversant le canal de l'anche. La lèvre inférieure consistait en une mousse en néoprène sur laquelle reposait une pointe métallique pour simuler la dent, la pression de l'ensemble sur l'anche étant, comme précédemment, ajustable par une vis.

Mooney [67], pour son étude du conduit vocal, a également réalisé une bouche artificielle. Même si la cavité buccale n'est pas réaliste et est du même ordre que toutes les autres bouches artificielles, certains détails anatomiques ont été cependant pris en compte. Ainsi, un dentiste a réalisé un moulage des incisives de Mooney, clarinettiste professionnel, et l'angle entre les dents et le bec de clarinette a été déterminé à partir de clichés radiographiques pris en situation de jeu puis soigneusement reproduit dans la bouche artificielle. D'autre part, une langue a été ajoutée (une bande de mousse en polyuréthane), pour voir l'effet d'une déviation du jet, lorsqu'il arrive sur l'anche, sur le spectre.

Bak et Domler [10] ont également réalisé une bouche artificielle, pour l'étude en particulier de la fréquence de jeu en fonction de la pression d'alimentation dans la bouche. La lèvre était un ballon rempli d'eau, placé sur toute la surface de l'anche et qui pouvait être pressé à ses deux extrémités : à l'extrémité fine pour régler la pression exercée par la lèvre sur l'anche et à l'extrémité opposée (à la base de l'anche), pour régler l'amortissement exercé par cette lèvre. Un microphone quart de pouce était inséré dans le bec, près du bout de l'anche.

Une bouche artificielle a également été développée au Mans au cours de plusieurs thèses (Meynial[65], Gilbert [40], Gazengel [37], Ollivier [74]). Elle permet, grâce à un capteur différentiel, de mesurer la différence de pression de part et d'autre de l'anche ainsi que l'ouverture de l'anche

grâce à un laser et une diode photoélectrique (à l'image du dispositif de Backus). L'utilisation d'un diaphragme en sortie du barillet permet également de déterminer la caractéristique non-linéaire.

Enfin, la nouvelle-née RIAM (Reed Instruments Artificial Mouth) en 2003 en Autriche [63], intégralement automatisée grâce à des moteurs et des dispositifs électromécaniques pilotés par ordinateur, permet un contrôle fin des paramètres comme la pression d'alimentation, la position de la lèvre dans deux directions et la force de contact qu'elle applique sur l'anche.

D'autres dispositifs artificiels ont également été développés pour d'autres instruments à vent (le hautbois (Almeida [1]), la trompette (Vergez [92]), les cuivres en général ([17])) ainsi que pour l'étude de la parole [93], pour laquelle le dispositif est très semblable à une bouche artificielle pour cuivres, les cordes vocales remplaçant les lèvres et le conduit vocal l'instrument. Bien que ces dispositifs sortent du cadre de notre étude, je les cite ici car ils nous ont servi pour la conception de notre bouche artificielle, en particulier pour la réalisation des lèvres.

Maintenant que les bases de notre étude ont été exposées, tant sur le plan théorique que sur le plan expérimental, nous allons pouvoir rentrer dans le vif du sujet, avec la détermination de l'impédance du conduit vocal des clarinettistes.

Chapitre 2

Le conduit vocal et son impédance

2.1 Introduction

Il est évident que la section de la clarinette est plus faible que celle du conduit respiratoire du musicien de sorte que son impédance acoustique sera bien plus importante et les résonances plus aiguës (facteur de qualité des résonances plus grand). Cependant, les musiciens étant capables de déceler des variations subtiles, il s'avère crucial de connaître l'impédance de leur conduit respiratoire en situation de jeu afin d'évaluer si ce dernier peut effectivement induire des effets importants musicalement.

Comme les mesures réalisées par le passé (cf chapitre 1) ne sont pas complètement exploitables ou utilisables, un nouveau système de mesure a été mis en place à l'UNSW et sera présenté en première partie de ce chapitre. Il permet une mesure en quasi situation de jeu (le musicien peut souffler mais non jouer) ce qui permet au clarinettiste d'adopter, de manière très reproductible, une configuration de conduit vocal analogue à celle qu'il a en cours de jeu.

Dix sept clarinettistes australiens, de niveau avancé ou professionnel, ont participé à l'expérience et les mesures seront analysées dans une seconde partie.

Enfin, les résultats obtenus seront comparés à des simulations numériques - établies grâce à des modèles récents réalisés dans le domaine de la parole- qui nous seront ensuite utiles pour une analyse théorique des effets du conduit vocal au chapitre 3 ainsi que pour l'analyse des résultats de la bouche artificielle au chapitre 4.

2.2 Dispositif de mesure d'impédance

2.2.1 Le spectromètre d'impédance

Le dispositif est basé sur un spectromètre déjà développé par Smith et Wolfe à l'UNSW [82] qui permet la mesure de l'impédance acoustique complexe. Le principe repose sur la méthode

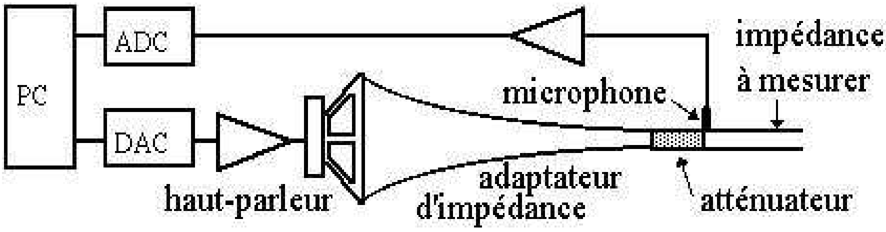


FIG. 2.1 – Spectromètre d'impédance de l'UNSW

du capillaire : un atténuateur acoustique de très grande impédance permet de transformer la source de pression (le haut-parleur) en source de courant acoustique quasi idéale[1]. La calibration est détaillée à la partie 2.2.4 mais il est nécessaire pour la suite de savoir qu'elle est réalisée sur un tuyau cylindrique, de diamètre 7.8 mm.

L'atténuateur ainsi que la tête de mesure proprement dite (un cylindre de même diamètre que le tuyau de calibration, soit 7.8 mm, dans lequel est inséré l'atténuateur) ont été conservés car leur section correspond approximativement à la surface effective de l'anche dans la bouche. L'atténuateur comprend un cône tronqué (qui commence, en partant de la source - par un adaptateur en pavillon exponentiel) placé à l'intérieur d'une pièce conique également, de même axe, d'angle très faible. Les deux surfaces coniques sont séparées par quatre bouts de fil métallique très fin (diamètre de 120 microns) et bien rectilignes, disposés comme sur la figure 2.2).

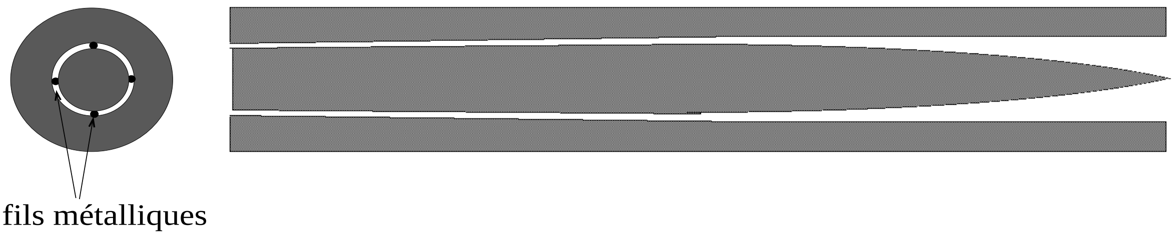


FIG. 2.2 – L'atténuateur, d'un diamètre extérieur de 7.8 mm. Dans un souci de lisibilité, les fils, de diamètre 120 microns, n'ont pas été représentés sur la vue de profil et les proportions n'ont pas été entièrement respectées.

Un des problèmes majeurs a résidé dans l'insertion de cette tête de mesure dans le bec de clarinette.

2.2.2 Insertion de la tête de mesure dans le bec

L'atténuateur

Comme nous recherchons des situations de forte impédance (comparable à celle de la clarinette), il est nécessaire de ne pas déranger le musicien par le dispositif, en particulier il ne faut

[1]Il faut en fait corriger les mesures en tenant compte de l'impédance de l'atténuateur, valant 1.85 MPa.s.m^{-3}, en parallèle avec l'impédance de la charge acoustique inconnue.

pas qu'il ait quelque chose de plus grand qu'un bec de clarinette dans la bouche. Le problème est donc de faire tenir l'atténuateur dans le bec, sachant que la mesure doit être faite le plus près possible de l'extrémité de l'anche. Si nous choisissons de le mettre parallèle à la paroi du bec, ce qui permettrait de ne déranger aucunement le musicien, nous sommes malheureusement confrontés à un problème de forte discontinuité lors de la calibration entre la section de l'atténuateur elliptique, de grand axe grand devant le petit axe, et la section circulaire du tuyau de calibration. Il a donc fallu trouver un compromis entre un angle qui ne dérange pas trop le musicien et un angle qui permet une calibration correcte. L'angle finalement adopté est celui pour lequel l'atténuateur sort du bec à l'endroit où le musicien pose ses dents.

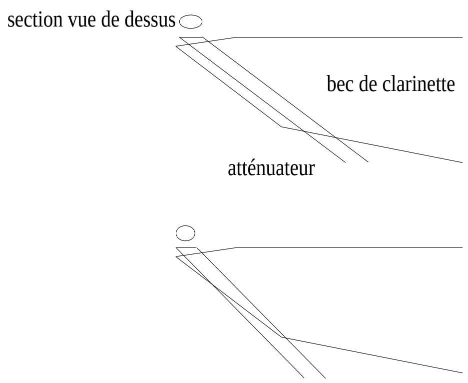


Fig. 2.3 – Deux angles de positionnement de l'atténuateur dans le bec : en haut, l'angle idéal pour ne pas déranger le clarinettiste, en bas, l'angle compromis finalement choisi

En fait, d'autres géométries d'atténuateur ont été testées, comme par exemple un atténuateur courbé à son extrémité ce qui permettait qu'il ne sorte pas du bec tout en gardant une section circulaire à son extrémité, ou bien un atténuateur droit et incliné comme en haut de la figure 2.3 où les volumes supplémentaires aux extrémités de l'ellipse avaient été bouchés, mais les mesures effectuées sur des tuyaux cylindriques ne se sont pas révélées satisfaisantes (mauvais accord avec la théorie au niveau des amplitudes comme des fréquences de résonance). C'est ainsi que nous avons abouti à la géométrie décrite au paragraphe précédent.

Le microphone

Le microphone utilisé est un microphone miniature de la marque Countryman (modèle CAI-B6, miniature B6), de diamètre 2 mm. Sa position est cruciale pour la mesure. Comme il est malheureusement impossible de le faire tenir au niveau de la table du bec, au bout du tuyau cylindrique contenant l'atténuateur, nous avons reculé l'atténuateur dans ce cylindre d'une distance l, et placé le microphone à sa sortie, ce qui rajoute, en amont du résonateur mesuré, un cylindre de longueur l et de diamètre 7.8 mm. D'une part, l a été choisie de sorte qu'il soit aisé de retrancher cette longueur additionnelle à l'impédance mesurée, par un simple modèle unidimensionnel : il faut en fait que l soit assez grande et nous l'avons choisie égale à 9 mm. D'autre part, la position précise du microphone à la sortie de l'atténuateur a été choisie sur la ligne médiane. En effet, en raison de la section finale elliptique du cylindre de mesure, la symétrie cylindrique a été rompue de sorte que la position exacte du microphone s'est avérée

importante. Ce sont des tests sur des tuyaux cylindriques dont l'impédance est bien connue théoriquement qui nous ont permis de trouver la meilleure position pour le microphone.

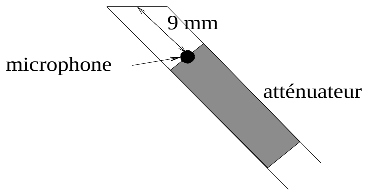


FIG. 2.4 – Position du microphone et de l'atténuateur dans la tête de mesure

Le microphone a été inséré à travers un trou réalisé dans la paroi latérale du bec.

Introduction d'une fuite

Afin de ne pas mesurer l'impédance de la clarinette en parallèle de l'impédance du conduit vocal, nous avons dû sceller l'embouchure avec de la colle araldite. Le musicien ne peut donc plus jouer ! Des expériences préliminaires sur un clarinettiste dévoué nous ont cependant montré que les musiciens peuvent mimer sans problème la configuration de CV mais pas l'ouverture glottique. Or celle-ci affecte dramatiquement l'amplitude des résonances puisque si la glotte est trop ouverte, nous pouvons nous attendre à ce que l'absorption quasi totale par les poumons réduise fortement l'impédance (en particulier les résonances autres que la première). Le mime aisé de la configuration du CV sans retour auditif s'explique par le fait que les clarinettistes ont une "mémoire musculaire" développée (surtout s'ils sont professionnels) par des années de pratique instrumentale : en effet, avant de commencer à jouer, les musiciens préparent la configuration qui va leur permettre d'avoir, dès l'attaque, la bonne intonation, la bonne nuance, etc. En revanche, pour l'ouverture glottique, le contrôle ne peut se faire qu'en soufflant (ce qui ne signifie pas nécessairement en jouant).

Nous avons donc introduit ce que l'on cherche par ailleurs toujours à éviter en acoustique, c'est-à-dire une fuite ! Celle-ci devait être la plus courte possible, afin que ses résonances soient hors du domaine de fréquence qui nous intéresse et donc ne faussent pas la mesure, tout en sortant quand même de la bouche. De plus son diamètre devait être suffisamment petit pour que son impédance soit très grande par rapport à l'impédance, en parallèle, du conduit vocal. Pour cette raison, un tube de 40 mm de long et 3 mm de diamètre (de première fréquence de résonance supérieure à 4000 Hz) a été creusé latéralement dans le bec.

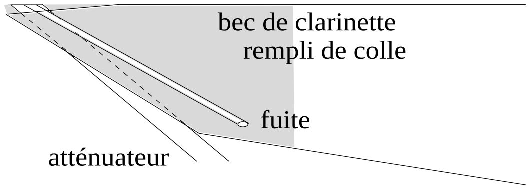


FIG. 2.5 – Introduction d'une fuite

De plus, cette fuite est remplie de mousse acoustique afin, d'une part, de réduire les bruits de turbulence dus au flux d'air, et d'autre part de produire une résistance statique comparable à celle de la clarinette, tout en éliminant les résonances de ce petit tube.

2.2.3 Chauffage

Pour empêcher la condensation d'eau, un circuit électrique basse tension (mise en série et en parallèle d'un certain nombre de résistances afin de constituer une couverture chauffante) a été utilisé pour élever par effet Joule la température du dispositif à 40 $^\circ$ C.

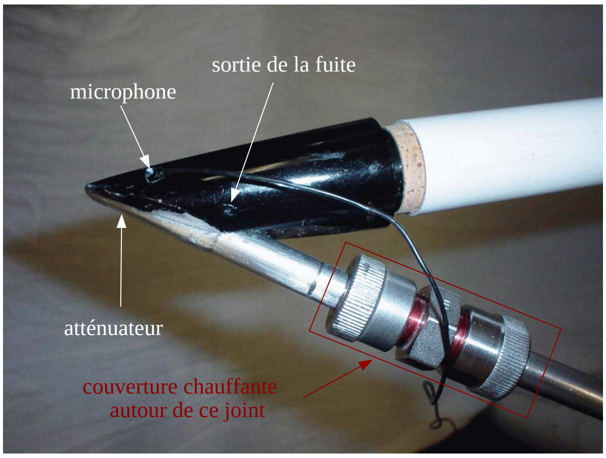


Fig. 2.6 – Le bec de mesure

2.2.4 Calibration

La calibration se fait sur un tuyau cylindrique "infini", c'est-à-dire de longueur telle que l'onde réfléchie soit atténuée de 80 dB par rapport à l'onde incidente et puisse donc être considérée comme négligeable. Le tuyau faisant 7.8 mm de diamètre, sa longueur est de 42 m. L'avantage d'un tel tuyau est que son impédance est une résistance pure, égale à $\rho c/S$ où S est sa section droite, ce qui permet d'avoir une bonne précision sur l'ensemble de la gamme de fréquences. Le principe de la calibration est le suivant : un signal large bande alimente le haut-parleur lors de la mesure de l'impédance connue du tuyau infini. Ceci permet d'obtenir la réponse fréquentielle de la chaîne de mesure qui, inversée puis utilisée comme signal d'alimentation du haut-parleur, permet ensuite d'obtenir directement l'impédance d'une charge acoustique inconnue.

Une pièce a ainsi été conçue pour raccorder ce tuyau à la tête de mesure, de manière reproductible. Il faut ainsi visser la pièce droite de la figure 2.8 sur la pièce gauche. Un filet de pâte à modeler placé sur la section elliptique de la tête permet de renforcer l'étanchéité.

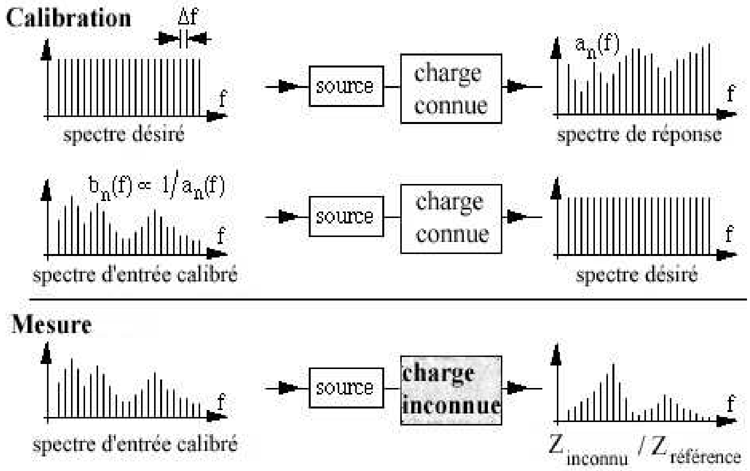


Fig. 2.7 – Principe de la calibration

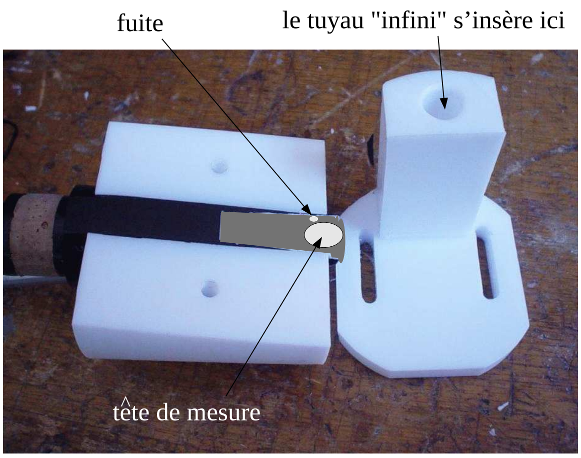


Fig. 2.8 – Pièce pour réaliser de manière fiable la calibration

2.2.5 Réalisme de la mesure

En raison du couple trop important qu'aurait exercé le poids de la clarinette sur l'ensemble du dispositif, celle-ci a été remplacée par un tuyau en PVC, donc ultra-léger. Sur celui-ci ont été collés des petits joints circulaires et un “repose pouce” afin de simuler de manière réaliste une vraie clarinette. En effet, ce tuyau permet aux musiciens de retrouver des sensations dans les mains qui leur donne alors l'impression de jouer sur une vraie clarinette.



Fig. 2.9 – Dispositif complet

2.3 Les mesures

2.3.1 Protocole

Dix sept clarinettistes australiens ont participé à l'expérience. Exceptés deux amateurs, leur niveau était soit avancé soit professionnel. Ils ont commencé par remplir un questionnaire sur leur formation musicale et sur leur opinion à propos de l'influence du conduit vocal (cf annexe D) au cours du jeu. En ce qui concerne les mesures, ils ont dû mimer, de manière mezzo forte, les notes suivantes : (en notation écrite) G3, G4, G5 et G6 pour étudier l'influence du registre ainsi que différentes longueurs de tuyau ; des effets particuliers comme le pitch bend, le changement de registre legato (sans articuler), le mime de certaines voyelles ("ee" et "aw" ou "ah"[2]) ainsi que des embouchures de leur propre suggestion utilisées pour différentes conditions de jeu. Ils pouvaient bien sûr à tout moment jouer sur leur propre clarinette afin de vérifier leur embouchure.

Les mesures ont été réalisées sur une bande de fréquence de 100 à 3000 Hz, afin d'inclure la gamme de l'instrument. Le choix de la fréquence d'échantillonnage dans le domaine fréquentiel résulte d'un compromis entre un rapport signal à bruit correct et une durée de mesure relativement courte. Cette dernière a en effet était choisie de 10 secondes, car il est fatiguant et difficile pour un musicien de garder l'embouchure constante sur une plus longue durée. D'autre

[2]La notation phonétique n'est pas utilisée ici pour distinguer les voyelles qui sont mimées en situation de jeu, de celles, nécessairement différentes, de la parole. Les premières ne correspondent en fait qu'à une impression de ce que le musicien réalise avec son conduit vocal.

part, la période du signal injecté au haut-parleur est l'inverse de la résolution fréquentielle et ce signal est une somme d'harmoniques dont les fréquences (exceptés le fondamental et les premiers harmoniques) appartiennent à la gamme de mesure. Ceci implique qu'une réduction de la fréquence fondamentale engendre un nombre plus élevé d'harmoniques dans la gamme considérée et de ce fait diminue l'énergie pour chaque harmonique, et par conséquent le rapport signal à bruit. Après une série d'expériences préliminaires sur un instrumentiste volontaire heureusement très disponible, nous avons choisi une fréquence d'échantillonnage de 5.385 Hz (résultat de la division de la fréquence d'échantillonnage de la carte d'acquisition (44.1 kHz) par 2^{13} [3]).



FIG. 2.10 – Expérience réalisée sur Lawrence Dobell, clarinette solo de l'Orchestre Symphonique de Sydney

2.3.2 Reproductibilité des mesures

La reproductibilité a été testée en réalisant plusieurs mesures de l'embouchure pour la même note (G3) sur la durée d'une session, soit environ 40 minutes. Les musiciens sont capables de reproduire la même embouchure avec le degré de précision suivant : dans le cas de la figure 2.11, la deuxième résonance est obtenue à 1250 Hz, avec un écart type de 40 Hz en fréquence et de 15% en amplitude.

[3] Une fenêtre de 2^N points avec N entier, permet en effet une transformée de Fourier discrète plus rapide qu'une fenêtre à un nombre arbitraire de points.

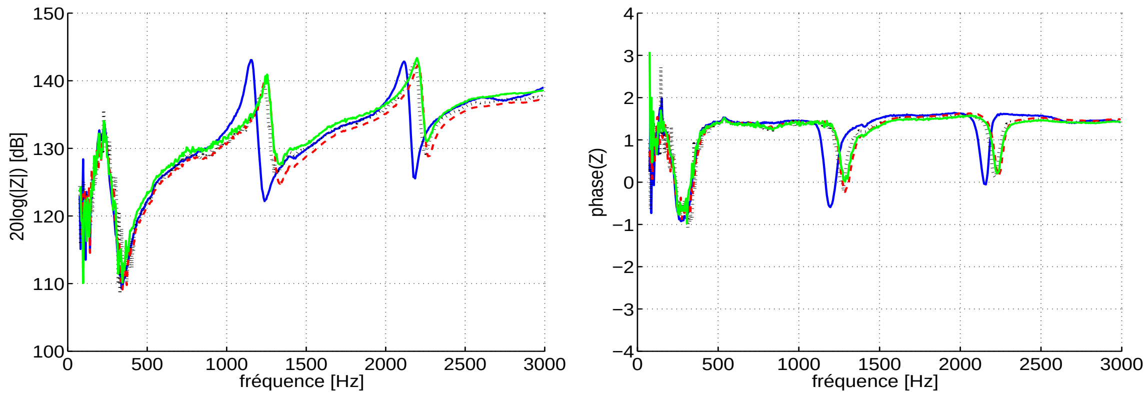


Fig. 2.11 – Test de reproductibilité : impédance du conduit respiratoire pour la note G3 à quatre instants différents, sur une durée de 40 minutes.

2.3.3 Commentaires généraux

Les musiciens semblent adopter une configuration stable sur l'ensemble des registres, à l'exception de quelques-uns qui changent de configuration dans le suraigu, pour la note G6. Ceci a d'ailleurs été cité par un musicien : il est préférable d'avoir une embouchure qui fonctionne partout afin de pouvoir jouer rapidement sur tout le registre.

L'amplitude moyenne de l'impédance est à peu près la même pour tous les musiciens. Le premier pic, dont la fréquence se situe aux alentours de 200 Hz a une amplitude comprise entre 1.8 et 5.6 MPa.s.m^{-3} (125-135 dB). Les résonances suivantes diffèrent par contre en fréquence et en amplitude. Les plus marquées se situent entre 30 et 100 MPa.s.m^{-3} (150-160 dB), ce qui est du même ordre que les pics de la clarinette.

Alors que ce n'est pas toujours très marqué chez les musiciens avancés, la différence entre les configurations "normales" utilisées pour la série des G et les configurations pour les "effets spéciaux" peut s'avérer très importante pour les musiciens professionnels.

Ce qui est surprenant, c'est la similitude dans l'allure des impédances entre les configurations "ee" et "aw" pour la majorité des musiciens, excepté quelques professionnels et Joe Wolfe, qui a grandement l'habitude de chercher à contrôler ce qu'il fait pour les expériences scientifiques ! Ainsi, le pic représentatif du /i/ vers 700 Hz n'apparaît que rarement. En revanche, le niveau général est plus élevé de 5 à 10 dB pour le "ee" que pour le "aw".

Des courbes d'impédances pour quelques professionnels sont présentées en annexe E.

2.3.4 Variations entre les musiciens pour un jeu "normal"

Examinons ici les variations sur les configurations qualifiées de normales par les musiciens, c'est-à-dire celles qu'ils adoptent usuellement, lorsqu'il n'y a pas d'intention musicale particulière, dans la nuance mezzo forte. Pour cela, prenons l'exemple de la note G4, qui correspond pour presque chaque musicien à la configuration qu'ils ont sur l'ensemble du registre excepté le

suraigu, et la note G6 dans le suraigu. Dans la figure 2.12, ce sont les deux mêmes musiciens pour les deux notes.

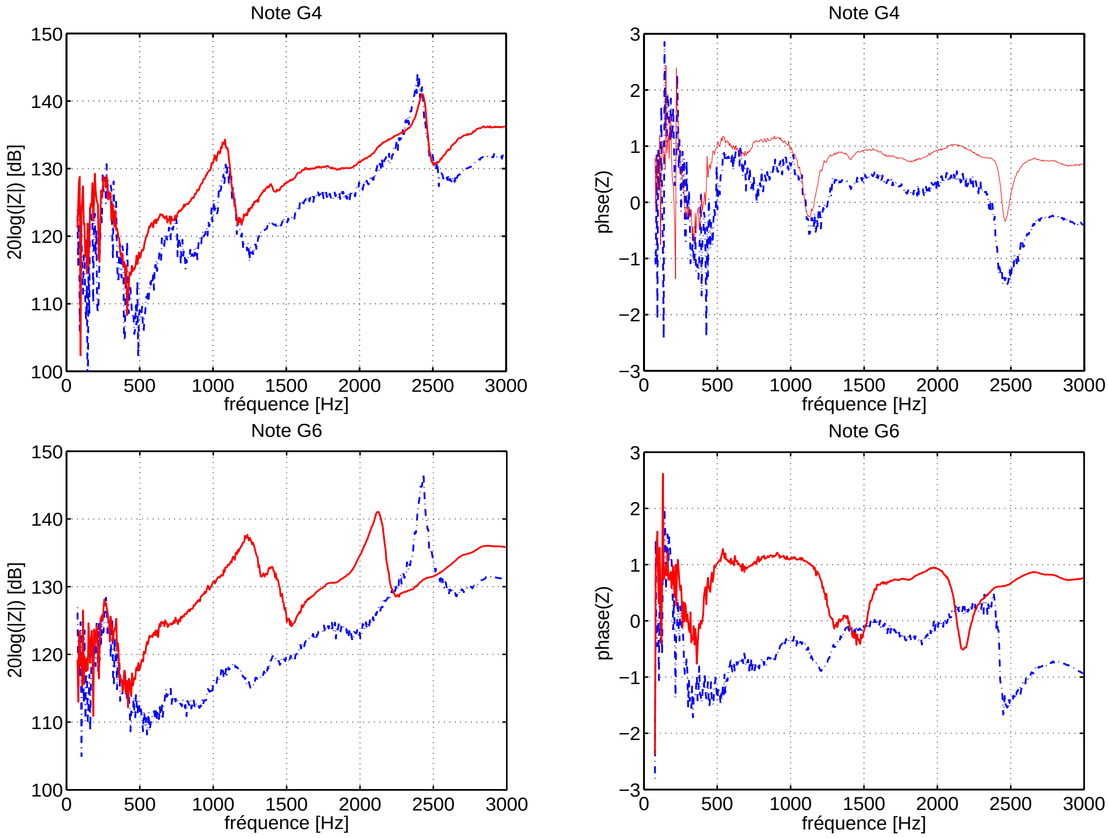


FIG. 2.12 – Impédance du conduit respiratoire de deux musiciens (Deborah De Graaff en pointillé et Peter Jenkin en trait plein), pour la note G4 en haut et la note G6 en bas

La configuration pour la note G4 est qualitativement similaire pour ces deux musiciens. A quelques exceptions près (par exemple Margery Smith, cf figure E.7), c'est une configuration adoptée par de nombreux musiciens pour un jeu "normal" dans le grave et l'aigu comme le prouve la similarité entre les figures E.1, E.4, E.10 et E.12. Ces mêmes figures montrent en revanche que la modification du conduit vocal pour jouer le suraigu est très différente suivant les musiciens. Certains tendent à renforcer le deuxième pic et à le déplacer dans la plage de fréquence de la note à jouer (le G6 est à 1397 Hz), comme Peter Jenkin ou Margery Smith , alors que d'autres, comme Deborah De Graaff ou Lawrence Dobell, ont au contraire tendance à le faire disparaître.

Cette grande variation parmi les musiciens conduit à une conclusion importante pour les clarinettistes : il n'y a pas de recette miracle !

2.3.5 Variations utilisées par les musiciens

Même s'ils utilisent une configuration assez stable sur l'ensemble du registre, les musiciens sont unanimes sur le fait qu'ils peuvent changer de configuration afin d'obtenir différents effets. Il est évident qu'une des principales conséquences de ce changement de configuration résulte

en la modification de la force et de la position des lèvres sur l'anche. Cependant, la figure 2.13 ainsi que les figures E.3, E.9 et E.11 montrent deux aspects, liés entre eux. D'une part, dans la plupart des cas, les musiciens changent effectivement (ce qui est plus fort que de dire simplement qu'ils "peuvent" changer car pour certains effets, ils "doivent" changer) leur configuration pour obtenir les effets demandés, puisque, en comparaison des courbes citées au paragraphe précédent donnant les impédances en jeu normal, l'impédance est fortement modifiée. D'autre part, cette variation importante d'impédance pourrait suggérer que la seule modification de l'embouchure proprement dite n'est certainement pas responsable de tout l'effet.

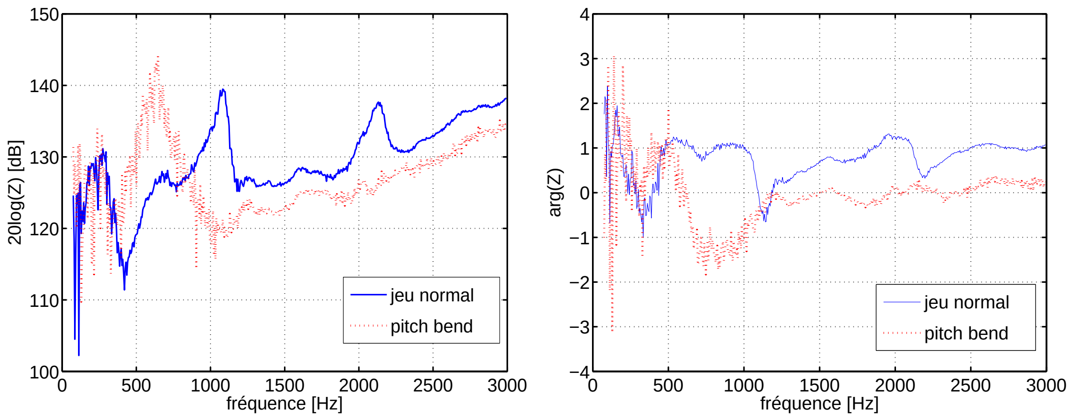


Fig. 2.13 – Comparaison entre l'impédance du mode de jeu normal et l'impédance du pitch bend, chez le musicien Lawrence Dobell

Il est intéressant de remarquer l'extraordinaire similitude entre les figures E.9 et E.11, correspondant aux impédances de Margery Smith et de Lawrence Dobell pour les "effets spéciaux", alors que les impédances de ces deux mêmes musiciens pour le jeu normal diffèrent notablement (figures E.7 et E.10). Serait-ce dû au fait que ces deux musiciens ont joué pendant quelques années dans le même orchestre (le Sydney Symphony Orchestra) et auraient de ce fait cherché à avoir un son semblable ?

Margery Smith (figure 2.14) est une des seules musiciennes australiennes à s'exprimer vraiment en terme de voyelle (alors que les musiciens français en parlent quasiment systématiquement) : elle utilise un "ee" pour l'aigu et pour rendre le son plus brillant et va au contraire assombrir ou baisser le son avec un "aw".

Cependant, d'autres musiciens décrivent ce qu'ils font par rapport à la position de la langue, haute ou basse dans la bouche, ce qui revient approximativement au même (le "ee" correspondant à une position haute de la langue et le "aw" à une position basse) au niveau de la configuration sans pour autant qu'ils considèrent obtenir le même effet. Ainsi, Karl Murr (figure 2.15) trouve qu'avec la langue basse, le son est plus riche en harmoniques mais n'est pas "centré" alors que la position haute lui permet d'avoir un son plus "centré", au détriment de la richesse harmonique.

Pour interpréter un peu mieux ces mesures et surtout pour remonter à la géométrie du conduit vocal des musiciens afin de l'utiliser dans la bouche artificielle, il s'avère intéressant de pouvoir calculer numériquement, sur une large gamme fréquentielle, l'impédance du conduit vocal.

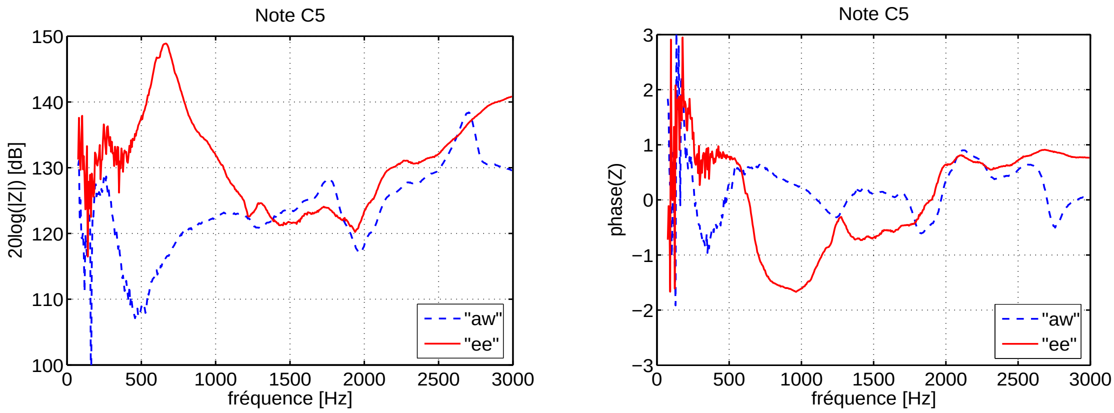


FIG. 2.14 – Impédance du conduit respiratoire de Margery Smith pour deux configurations de conduit vocal "ee" et "aw", pour la note C5

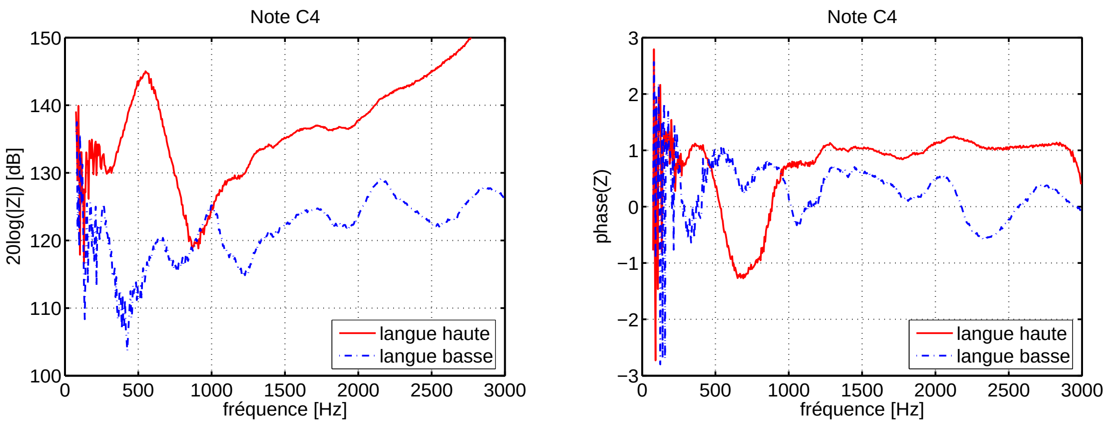


FIG. 2.15 – Impédance du conduit respiratoire de Karl Murr pour deux positions, haute et basse, de la langue, pour la note C4

2.4 Simulations numériques du conduit respiratoire

2.4.1 Modélisation du conduit vocal

Les fonctions de transfert du conduit vocal sont très souvent calculées dans le domaine de la parole. Dans cette discipline, c'est généralement l'impédance d'entrée à la glotte qui est source d'intérêt. Il faut donc inverser la méthode de calcul et déterminer la condition terminale à la glotte.

Le modèle utilisé est celui développé par Sondhi [84, 86]. Le conduit vocal, à parois souples, est représenté par une succession de cylindres concaténés et la relation qui lie les variables à l'entrée des cylindres $k+1$ et k (k=0 à la glotte) est la suivante :

$$\begin{pmatrix} p_{k+1} \\ u_{k+1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} \begin{pmatrix} p_k \\ u_k \end{pmatrix} \tag{2.1}$$

avec

$$
\begin{aligned}
A &= D = \cosh(\frac{\sigma l}{c}) \\
B &= \frac{\rho c}{S}\gamma \sinh(\frac{\sigma l}{c}) \quad C = \frac{S}{\rho c}\gamma \sinh(\frac{\sigma l}{c})
\end{aligned}
\tag{2.2}
$$

avec

$$\gamma = \sqrt{\frac{r + j\omega}{\beta + j\omega}} \tag{2.3}$$

$$\sigma = \gamma(\beta + j\omega) \tag{2.4}$$

$$\beta = \frac{j\omega\omega_t^2}{(j\omega + r)j\omega + \omega_w^2} + \alpha \tag{2.5}$$

$$\alpha = \sqrt{j\omega q} \tag{2.6}$$

où r et ω_w sont reliés aux propriétés des parois, non rigides : ils représentent respectivement le rapport entre la résistance des parois et leur masse et la fréquence de résonance mécanique des parois. Leurs valeurs sont choisies égales à r = 408 rad.s^{-1} and $\omega_w/2\pi$ = 15 Hz. ω_t est la fréquence la plus basse du conduit vocal lorsqu'il est fermé aux deux extrémités (glottale et buccale), ce qui se produit lors de la phonation du /b/, qui n'existerait pas si les parois étaient rigides. ω_t a été mesurée égale à 200 Hz. Le paramètre q est un facteur correctif pour la conductivité thermique et visqueuse et vaut q = 4 rad.s^{-1}. Le calcul complet a été réalisé grâce à un programme développé par Story [89] après l'avoir inversé pour calculer l'impédance d'entrée au niveau de la bouche et non de la glotte.

Pour procéder au calcul entier, il nous faut encore les dimensions de la glotte (cylindre 0) car contrairement au cas de la parole, les cordes vocales ne sont pas complètement fermées, ainsi que la condition terminale à la glotte : $p_0 = Z_{sg}u_0$, où Z_{sg} est l'impédance d'entrée du conduit subglottal.

2.4.2 La glotte



Fig. 2.16 – Ouverture des cordes vocales d'un joueur professionnel, observée par Mukai [71]

D'après l'étude par laryngeoscopie de Mukai [71], la glotte des musiciens professionnels est une fente que l'on considèrera en première approximation comme rectangulaire, de longueur $a = 10$ mm, de largeur $b = 1.5$ mm et d'épaisseur $e = 3$ mm.

Cependant, l'onde acoustique qui sort de la glotte entre dans la trachée, de section beaucoup plus importante, de sorte qu'il faut tenir compte de la correction d'extrémité pour un tuyau bafflé : l'épaisseur effective de la glotte vaut donc $e_{eff} = e + 0.85 r_g$ [4] où r_g est le rayon équivalent de la glotte ($r_g = \sqrt{ab/\pi} = 2.2$ mm).

Par conséquent, le cylindre 0, qui modélise la glotte et donc termine le conduit vocal, a pour longueur $e_{eff} = 4.7$ mm et section ab.

2.4.3 Le conduit subglottal

Modèle élémentaire

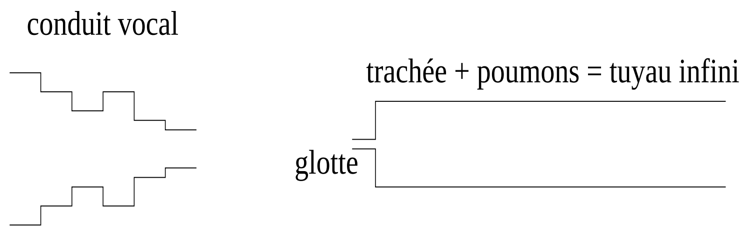


FIG. 2.17 – Modélisation du conduit respiratoire

L'absorption totale par les poumons est modélisée par un tuyau infini, de rayon égal à celui de la trachée (r_t =9 mm), d'impédance purement resistive

$$Z_{sg} = \frac{\rho c}{\pi r_t^2} \tag{2.7}$$

Cette impédance est l'impédance terminale qu'il faut utiliser pour calculer l'impédance d'entrée du conduit vocal (qui finit à la glotte).

Modèle plus élaboré, réalisé par Harper *et coll.* [45]

La résistance des poumons précédente (2.7) doit être remplacée par un calcul plus précis de l'impédance du conduit subglottal. La ligne de transmission de la figure 2.18 (d'après des travaux de Ishizaka *et coll.* [51]) est utilisée. Ceci modélise un segment du conduit subglottal, qui comme le conduit vocal, est modélisé par la concaténation d'un certain nombre de cylindres.

[4] La correction de longueur est en réalité plus grande pour une fente rectangulaire que pour un diaphragme circulaire mais un calcul plus précis, qui pourrait être fait à partir de [69], ne s'avère pas utile ici compte-tenu de notre précision.

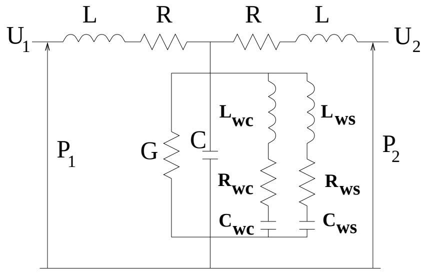


Fig. 2.18 – Circuit électrique équivalent au modèle acoustique du conduit subglottal

Les impédances par unité de longueur L and R, et les admittances par unité de longueur C et G sont données par les formules suivantes (Flanagan [32]) :

$$R = \frac{\pi\sqrt{\rho\mu f}}{S^{3/2}} \quad (2.8)$$

$$L = \frac{\rho}{S} \quad (2.9)$$

$$C = \frac{S}{\rho c^2} \quad (2.10)$$

$$G = \frac{0.8\sqrt{\pi S}}{\rho c^2\sqrt{\lambda\pi f/(c_p\rho)}}; \quad (2.11)$$

où μ est la viscosité de l'air, λ est le coefficient de conduction thermique, c_p est la capacité calorifique à pression constante de l'air. Les impédances C_w, L_w aet R_w sont caractéristiques de la non rigidité des parois. Comme celles-ci consistent en des tissus mous intercalés dans des anneaux de cartilage, chaque type de tissu peut être représenté par sa propre combinaison de résistance, d'inductance et de capacité en série (indice s pour les tissus mous et c pour le cartilage), telle qu'elle est décrite à la figure 2.18. L'approche choisie par Harper *et coll.* est de modéliser la composition hétérogène des tissus en spécifiant la fraction of cartilage c_{frac} de chaque segment puis en ajustant les paramètres de chaque segment de la manière suivante :

$$R_{wc} = R_{wct}/c_{frac} \quad (2.12)$$

$$R_{ws} = R_{wst}/(1-c_{frac}) \quad (2.13)$$

$$Lwc = L_{wct}/c_{frac} \quad (2.14)$$

$$L_{ws} = L_{wst}/(1-c_{frac}) \quad (2.15)$$

$$C_{wc} = C_{wct}c_{frac} \quad (2.16)$$

$$C_{ws} = C_{wst}(1-c_{frac}) \quad (2.17)$$

où les paramètres du circuit avec l'indice t sont calculés sur la longueur totale du segment en utilisant les paramètres typiques des tissus du tableau 2.1 :

$$R_{wxt} = \frac{\eta_{wx}h}{2\pi r^3 l} \quad (2.18)$$

$$L_{wxt} = \frac{\rho_{wx}h}{2\pi r l} \quad (2.19)$$

$$C_{wxt} = \frac{2\pi r^3 l}{E_{wx}h} \quad (2.20)$$

où x peut être c ou s.

paramètre	valeur
Densité des tissus mous (ρ_{ws})	1060 kg.m^{-3}
Viscosité des tissus mous(η_{ws})	160 N.s.m^{-2}
Elasticité des tissus mou (E_{ws})	0.392.10^5 N.m^{-2}
Densité du cartilage (ρ_{wc})	1140 kg.m^{-3}
Viscosité du cartilage (η_{wc})	18.10^3 N.s.m^{-2}
Elasticité de cartilage (E_{ws})	44.10^5 N.m^{-2}

TAB. 2.1 – Valeur des caractéristiques des parois du conduit subglottal

L'impédance est calculée par itérations successives de la relation matricielle suivante, sur la longueur totale du conduit subglottal [32], en commençant aux poumons ($i = 0$, $Z_0 = Z_l$) :

$$\begin{pmatrix} p_{i+1} \\ u_{i+1} \end{pmatrix} = s \begin{pmatrix} \cosh(\gamma l) & -Z_c \sinh(\gamma l) \\ -\frac{1}{Z_c} \sinh(\gamma l) & \cosh(\gamma l) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} p_i \\ u_i \end{pmatrix} \tag{2.21}$$

Si nous définissons $z = R + j\omega L$ et $y = G + j\omega C + Y_{wc}/l + Y_{ws}/l$, alors $\gamma = \sqrt{z.y}$ et $Z_c = \sqrt{z/y}$. Ceci donne par conséquent

$$Z_{i+1} = \frac{Z_i \cosh(\gamma l) - Z_c \sinh(\gamma l)}{\cosh(\gamma l) - \frac{Z_i}{Z_c} \sinh(\gamma l)} \tag{2.22}$$

Cependant, les segments de la ligne de transmission sont assemblé dans un arbre, similaire à la structure réelle du conduit subglottal. Ainsi la trachée se finit dans deux bronches, chacune d'elle connectée à deux autres branches, et ainsi de suite. Nous supposerons ici que l'arbre est symétrique de sorte que l'impédance terminale vue par le segment $i + 1$ n'est pas Z_i mais $Z_i/2$ de sorte que l'équation (2.22) devient

$$Z_{i+1} = \frac{\frac{Z_i}{2} \cosh(\gamma l) - Z_c \sinh(\gamma l)}{\cosh(\gamma l) - \frac{Z_i}{2Z_c} \sinh(\gamma l)} \tag{2.23}$$

Nous considérons ici un arbre de profondeur 10. Les paramètres de chaque niveau sont donnés dans le tableau 2.2.

Comme les nombreux petits segments du niveau 10 représentent au total une très large section, nous pouvons considérer que ceci représente une terminaison ouverte. L'impédance terminale au niveau des poumons Z_l peut être considérée dans ce cas nulle dans la gamme de fréquence qui nous intéresse, soit $f > 75$ Hz [5].

La figure 2.19 nous permet de visualiser ce que le modèle de Harper nous apporte : le premier pic et le premier creux sont déplacés vers les basses fréquences de respectivement 50 et 80 Hz, ce qui les rapproche plus de ceux mesurés, même si leurs fréquences restent quand même un peu trop élevées. En revanche, l'amplitude du premier pic augmente, ce qui la rend

[5] Il est évident que Z_l n'est pas nulle dans un voisinage de la fréquence nulle.

niveau	longueur du segment l [cm]	rayon r [cm]	épaisseur des parois h	fraction de cartilage c_{frac}
0	10.00	0.800	0.3724	0.6700
1	5.00	0.600	0.1735	0.5000
2	2.20	0.550	0.1348	0.5000
3	1.10	0.400	0.0528	0.3300
4	1.05	0.365	0.0409	0.2500
5	1.13	0.295	0.0182	0.2000
6	1.13	0.295	0.0182	0.0922
7	0.97	0.270	0.0168	0.0848
8	1.08	0.215	0.0147	0.0669
9	0.95	0.175	0.0114	0.0525
10	0.86	0.175	0.0114	0.0525

Tab. 2.2 – Caractéristiques de chaque segment constituant le conduit subglottal, commençant à la trachée (niveau 0)

trop importante par rapport à celle mesurée. Nous avons privilégié l'aspect fréquentiel par rapport à l'amplitude de sorte que nous avons gardé dans la suite le modèle de Harper. Nous ne comprenons cependant toujours pas pourquoi nous n'arrivons pas à obtenir correctement la première fréquence de résonance.

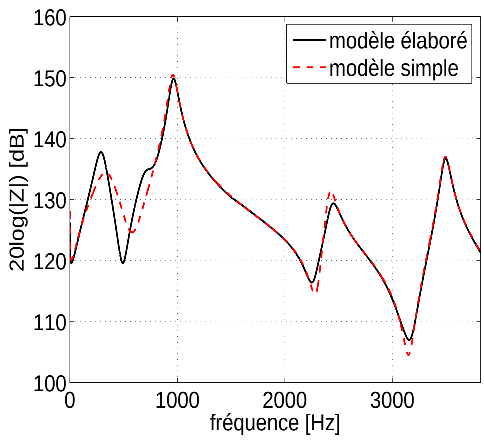


Fig. 2.19 – Comparaison entre le modèle simple du conduit subglottal (poumons assimilés à un tuyau infini) et le modèle élaboré de Harper

Nous avons maintenant presque tous les éléments pour procéder au calcul de l'impédance du conduit vocal. Il nous faut cependant encore la condition à l'autre bout. En effet, le clarinettiste ayant le bec dans la bouche, la première section du conduit vocal correspond à la superficie effective de l'anche dans la bouche, en l'occurrence, dans notre dispositif, elle correspond à la section de la tête de mesure.

2.4.4 Correction à l'entrée de la bouche

Que se passe-t'il lorsqu'une petite section d'anche (ou de tête de mesure) est insérée dans la bouche ? Cette situation ressemble à un problème commun en acoustique des tuyaux : celui de la discontinuité entre deux tuyaux. Ceci est souvent modélisé par une correction d'extrémité ajoutée au petit tuyau. Physiquement, cela représente l'inertance d'un petit volume d'air, près du piston, dans lequel le champ acoustique diverge fortement puisqu'un petit piston d'air ou l'anche rencontre un volume plus grand. La correction d'extrémité pour un tuyau bafflé est ici utilisée : on rajoute donc à l'entrée du conduit vocal une section de rayon r =3.9 mm et de longueur $l = 0.85r$ [34].

Pour une raison que nous développerons à la partie 2.5, le conduit vocal, de longueur moyenne 17 cm, est discrétisé tous les 5 mm, ce qui donne 34 sections, en plus de la section 0 que constitue la glotte. Le bec étant enfoncé dans la bouche sur à peu près 1 cm les deux premières sections sont en réalité en parallèle avec le reste du conduit vocal. Le calcul itératif décrit à la section 2.4.1 peut donc être effectué sur les 33 sections en partant de la glotte (sections 0 à 32), avec comme impédance au niveau de la glotte celle du conduit subglottal - ce qui donne l'impédance Z_1 -, ainsi que sur les deux sections à l'entrée de la bouche (sections 33 et 34) avec comme impédance limite une impédance infinie puisque la bouche est fermée sur le bec - ce qui donne l'impédance Z_2. L'impédance totale du conduit vocal non corrigée est donc

$$Z_{nc} = \frac{Z_1 Z_2}{Z_1 + Z_2} \tag{2.24}$$

ce qui donne avec la correction d'extrémité détaillée au paragraphe précédent :

$$Z_{CV} = Z_{nc} + jZ_0 \frac{\omega}{c} l \tag{2.25}$$

avec $Z_0 = \rho c/(\pi r^2)$.

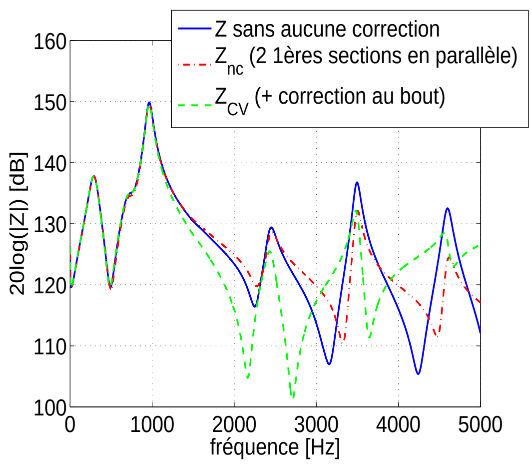


FIG. 2.20 – Effet des différentes corrections : Z est l'impédance sans aucune correction, Z_{nc} est l'impédance calculée lorsque les deux premières sections sont mises en parallèle (équation (2.24)) et Z_{CV} correspond à cette impédance corrigée suivant l'équation (2.25)

Il est important de noter, d'après la figure 2.20 que ces différentes corrections (mise en parallèle des premières sections, correction d'extrémité) ont surtout une influence à haute fréquence (au dessus de 3000 Hz). Or de toute manière, le modèle uni-dimensionnel n'est plus valable à haute fréquence puisqu'il faut tenir compte des modes transverses. Ainsi, El-Masri *et coll.* [25] ont montré que l'approximation en onde plane prédit mal le comportement acoustique du conduit vocal au-dessus de 4500 Hz. Il serait donc inutile de vouloir raffiner plus. L'intérêt cependant de ces corrections est de diminuer fortement les résonances supérieures, ce qui nous permettra d'éviter, dans les simulations du son de la clarinette, des artefacts dus à des résonances importantes à haute fréquence, qui n'auraient certainement pas de signification physique. D'autre part, la fréquence de coupure du réseau de trous latéraux de la clarinette[6] se situe vers 2000 Hz, donc c'est essentiellement dans la bande 0-3000 Hz que se porte notre intérêt.

2.4.5 Résultats pour deux voyelles. Ajustement.

Le but de cette simulation est de pouvoir "inverser" le modèle en obtenant la fonction d'aire à partir de la mesure d'impédance. Ainsi, une mise en correspondance a été réalisée avec l'aide de Brad Story entre les impédances calculées avec ce modèle complet (tenant compte de toutes les corrections) et la fonction d'aire : à partir de la donnée des trois premières fréquences de résonance, le programme détermine une fonction d'aire. Le "mapping" a été généré à partir des fonctions d'aires telles qu'elles sont données dans [90] (discrétisées par intervalle de 3.968 mm). La fonction d'aire obtenue par le "mapping" peut ne pas être unique et il convient de la vérifier a posteriori en calculant son impédance associée. Il se trouve que généralement, l'impédance recalculée s'éloigne assez notablement de l'impédance mesurée. J'ai donc mis au point un programme qui permet de retoucher localement la fonction d'aire en visualisant en direct l'effet sur l'impédance, ce qui permet d'arriver, de proche en proche, à une fonction d'aire possible physiologiquement et dont l'impédance est proche de celle mesurée originalement.

Je ne présenterai ici que deux résultats : pour la configuration "ee" (que je nomme ainsi car le musicien anglophone a la sensation de dire "ee" (comme dans "need") mais ne peut physiquement réaliser exactement la voyelle /i/ (comme dans "heed") ou /ɪ/ (comme dans "hid") puisqu'il a le bec de clarinette dans la bouche) à la figure 2.21, et pour la configuration "aw" (comme dans "paw")[7] à la figure 2.22. Les mesures ont été choisies parmi les musiciens qui contrôlent suffisamment bien leur conduit vocal afin d'avoir une certaine assurance sur la configuration qu'ils adoptent effectivement par rapport à celle qu'ils disent faire.

Dans le cas du "ee", la figure 2.21 nous permet de constater que la fonction d'aire obtenue

[6]La théorie de Benade, considérant le réseau de trous latéraux périodique (et suffisamment long), a montré qu'au-dessous d'une certaine fréquence, les ondes ne dépassent guère le premier trou ouvert, et on peut considérer en première approximation que le tuyau est coupé à cet endroit. Au-dessus de cette fréquence, les ondes parviennent à l'extrémité du tuyau, mais se propagent dans le réseau de trous avec une vitesse différente, ce qui rend les pics d'impédance d'entrée inharmoniques. En outre leur rayonnement devient beaucoup plus efficace, grâce à leur interaction extérieure, et la hauteur des pics diminue fortement. C'est pourquoi il est facile d'identifier la fréquence de coupure, même pour un réseau réel (non périodique et fini).

[7]Si par la suite vous êtes perdus dans la notation des voyelles, référez-vous à l'annexe A.

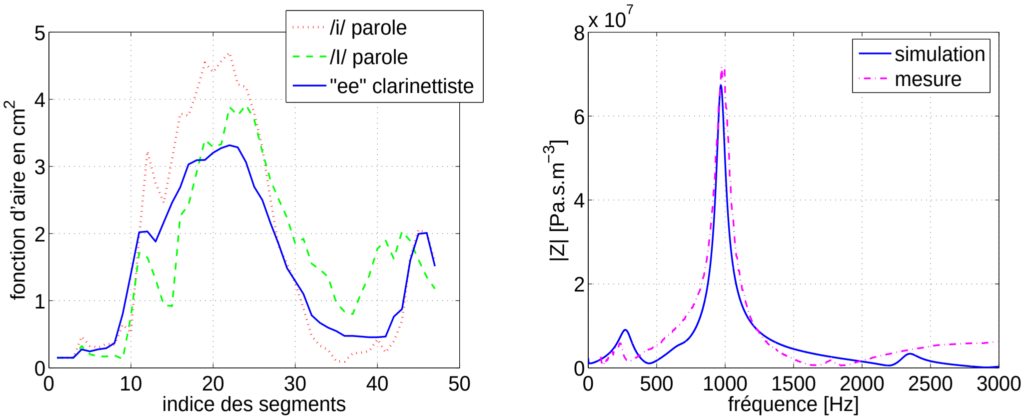


FIG. 2.21 – A gauche : fonction d'aire pour les voyelles /i/ et /ɪ/ (données de Story et Titze avec rajout de la glotte) ainsi que celle issue du "mapping" puis ajustée (dénommé "ee" clarinettiste). L'abscisse correspond à l'indice des segments : les deux premiers sont les segments glottiques, les 44 autres constituent les 17.4 cm de conduit vocal. La longueur de chacun des segments vaut 3.968mm, sauf le premier qui sert à ajuster l'épaisseur de la glotte à son épaisseur effective et qui vaut 1.13 mm. A droite : impédance mesurée sur Joe Wolfe et impédance simulée, correspondant au "ee" clarinettiste.

est cohérente puisqu'elle est assez similaire à celles des voyelles /i/ et /ɪ/. Ainsi, au niveau de la constriction palatale, cette fonction d'aire a une valeur quasi moyenne entre les deux et il est bien évident qu'il est impossible pour un clarinettiste de savoir s'il fait plutôt un /i/ ou un /ɪ/ ! A l'entrée de la bouche, la fonction d'aire a été fixée égale à la section du bec, à environ 1.5 cm du bout de l'anche.
Cependant, il nous a été impossible de recaler le premier pic : il s'avère systématiquement trop élevé en fréquence (par exemple entre 230 et 250 Hz au lieu de 200 Hz pour le "aw" et entre 250 et 280 Hz au lieu de 230 Hz pour le "ee") et un peu trop élevé en amplitude. D'autre part, une résistance de 1.5 MPa.s.m^{-3} a été ajoutée au niveau de la glotte pour mieux ajuster la hauteur des pics. Ceci peut être justifié par le fait qu'une constriction peut impliquer une perte d'énergie par turbulence et/ou par le fait qu'une partie de l'énergie des modes propagatifs est cédée aux modes non propagatifs.

Pour le cas du "aw" (figure 2.22) la fonction d'aire obtenue est très proche de la fonction d'aire de la voyelle correspondante. Cependant, le premier pic s'avère à nouveau trop élevé en amplitude, même si ce phénomène est ici renforcé par le fait que le premier pic de Deborah de Graaff est systématiquement de niveau très faible en comparaison des autres musiciens. Ainsi, pour la même voyelle, le premier pic de Joe Wolfe a une amplitude comprise entre 5 et 7 MPa.s.m^{-3}, ce qui est en accord avec l'amplitude simulée.

Il serait cependant illusoire de croire que cela marche parfaitement pour toutes les mesures. Il s'avère en effet souvent délicat d'ajuster "manuellement" la fonction d'aire obtenue par le "mapping" pour aboutir à une impédance proche de celle mesurée. De plus, certains paramètres n'ont pas été pris en compte comme le fait que chez certains musiciens, le bout de la langue vient se placer juste derrière la lèvre ce qui rajoute une compliance due au volume sous la langue. Ceci n'empêche pas pour autant d'obtenir une allure approchée de la fonction d'aire,

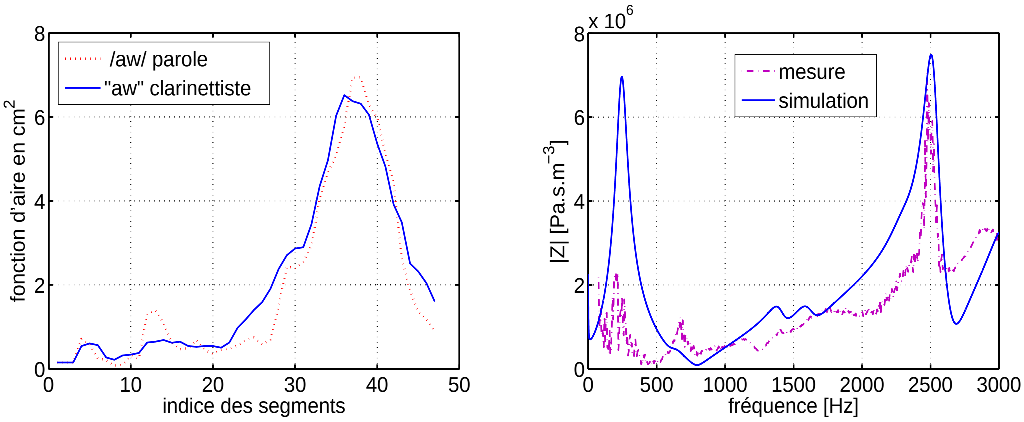


Fig. 2.22 – A gauche : fonction d'aire pour la voyelle /ɔ/ (comme dans "paw") ainsi que celle issue du "maping" puis ajustée (dénommée "aw" clarinettiste). L'abscisse correspond à l'indice des segments : les deux premiers sont les segments glottiques, les 44 autres constituent les 17.4 cm de conduit vocal. La longueur de chacun des segments vaut 3.968mm, sauf le premier qui sert à ajuster l'épaisseur de la glotte à son épaisseur effective et qui vaut 1.13 mm. A droite : impédance mesurée sur Deborah de Graaff et impédance simulée, correspondant au "aw" clarinettiste.

et de déterminer en particulier la géométrie de la cavité buccale par rapport à une éventuelle constriction palatale.

Avant d'utiliser ces résultats pour construire le conduit vocal artificiel qui sera utilisé avec la bouche artificielle, nous allons exposer une analogie électrique qui permet d'interpréter les premières résonances du conduit vocal.

2.4.6 Interprétation avec un circuit électrique simple

Il est intéressant d'essayer d'interpréter à quoi correspondent les premières résonances et anti-résonances en termes de systèmes à constantes localisées. Nous allons donc chercher des résonateurs de Helmholtz, dont les fréquences de résonances sont telles que la longueur d'onde est beaucoup plus grande que les dimensions géométriques. Pour ce faire, on ignore les termes de dissipation, pour ne conserver que les termes réactifs. Rappelons qu'un résonateur de Helmholtz peut être excité :

- soit en débit injecté dans son volume, et on s'intéresse à la pression à l'entrée du goulot, qui est maximum à la résonance. Ceci correspond dans l'analogie électrique classique à la résonance du circuit bouchon. Vu de l'entrée du conduit vocal, ce sont bien ces résonances qui nous intéressent.

- soit en pression imposée à l'entrée du goulot, et on s'intéresse au débit entrant dans le volume : ce seront pour nous les anti-résonances, qui correspondent à la résonance d'un circuit résonant dans l'analogie électrique.

A très basse fréquence ($kl \ll 1$ soit $f < 320$ Hz), le conduit vocal peut être grossièrement

représenté par le circuit électrique de la figure 2.23.

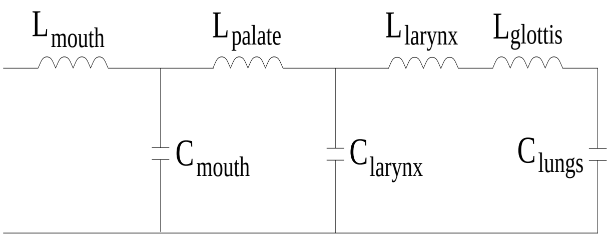


FIG. 2.23 – Circuit électrique équivalent

Nous ne tiendrons pas compte ici des corrections à l'entrée de la bouche. Cette modélisation n'est vraiment bonne qu'en dessous de 500 Hz et est à peu près correcte entre 500 et 1000Hz ; au-dessus, le circuit électrique ne peut décrire la propagation des ondes dans le CV. Ainsi la figure 2.24 montre comment le circuit électrique s'éloigne de la réalité plus la fréquence augmente. Cependant, l'avantage d'un tel circuit est de permettre une bonne compréhension à basse fréquence de comment la géométrie du conduit vocal influence les résonances et les anti-résonances.

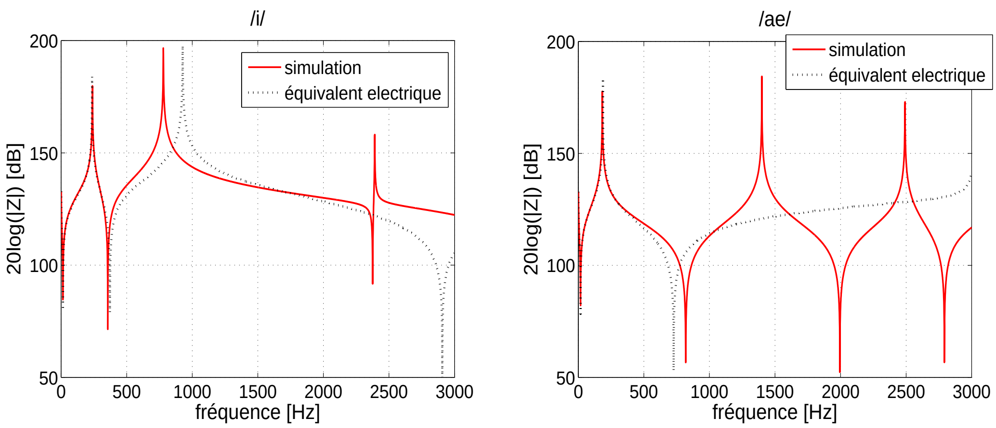


FIG. 2.24 – Module de l'impédance du conduit vocal pour les deux configurations /i/ et /æ/ calculé soit par la simulation complète détaillée dans les paragraphes précédents soit à l'aide du circuit électrique équivalent de la figure 2.23

Pour cette étude, nous nous sommes basés sur les valeurs de Story et Titze pour les fonctions d'aires de deux voyelles /i/ et /æ/ (mesurées en parole, durant la phonation), que nous avons discrétisées. Un profil des aires ainsi que des rayons est donné à la figure 2.25.

Les sections qui correspondent à la constriction palatale sont comprises entre $i = i_1$ et $i = i_2$, avec $i_1 = 23$ et $i_2 = 30$ pour /i/, $i_1 = 21$ et $i_2 = 22$ pour /æ/. Les valeurs des différents

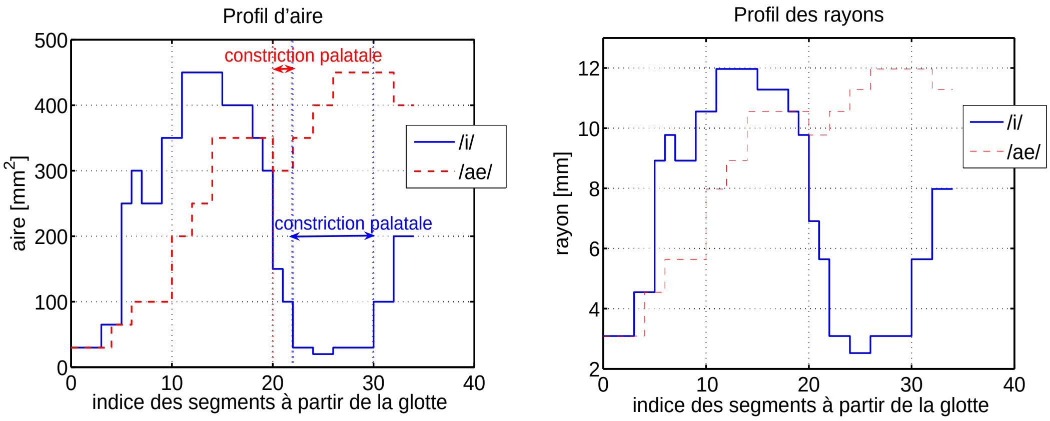


FIG. 2.25 – Profil des aires et des rayons pour les voyelles /i/ et /æ/ (en parole), discrétisés tous les 5 mm.

éléments sont alors données par :

$$L_{mouth} = \rho \sum_{i=i_2}^{34} \frac{l_i}{S_i} \tag{2.26}$$

$$C_{mouth} = \frac{1}{\rho c^2} \sum_{i=i_2}^{34} l_i S_i \tag{2.27}$$

$$L_{palate} = \rho \sum_{i=i_1}^{i_2} \frac{l_i}{S_i} \tag{2.28}$$

$$C_{larynx} = \frac{1}{\rho c^2} \sum_{i=1}^{i_1} l_i S_i \tag{2.29}$$

$$L_{larynx} = \rho \sum_{i=1}^{i_1} \frac{l_i}{S_i} \tag{2.30}$$

Les valeurs numériques des impédances sont données pour information dans le tableau 2.3. Les inductances sont en Pa.s.m^{-3} et les capacités en m^{3}Pa^{-1}.

impédance	/i/	/æ/
L_{mouth}	150	160
C_{mouth}	2,2.10^{-11}	1,8.10^{-10}
L_{palate}	1500	37
C_{larynx}	2.10^{-10}	1,3.10^{-10}
L_{larynx}	1050	1315

TAB. 2.3 – Valeurs numériques des composants électriques. Les inductances sont en Pa.s^2.m^{-3} et les capacités en m^{3}Pa^{-1}.

L'inertance de la glotte est donnée par $L_{glottis} = \rho e_{eff}/ab = 430\text{Pa.s}^2.\text{m}^{-3}$ et la capacité des poumons par : $C_{lungs} = \frac{V_l}{\rho c^2}$ avec $V_l \simeq 5L$, de sorte que $C_{lungs} = 4.10^{-8}\text{m}^3\text{Pa}^{-1}$.

Avec la valeurs de tous les paramètres, il est maintenant aisé de procéder au calcul complet de l'impédance totale. Celle-ci est comparée (cf tableau 2.4) à celle obtenue par la simulation numérique décrite précédemment avec cependant deux simplifications de sorte à se rapprocher davantage du circuit électrique ci-dessus :

- les parois du conduit vocal sont supposées rigides
- Z_{sg} ne prend en compte que l'impédance des poumons : $Z_{sg} = j\omega C_{lungs}$.

En fait, cette dernière simplification n'affecte que l'acuité des résonances (à cause de la résistance) et légèrement la première fréquence de résonance. Mais ceci n'affecte en rien l'interprétation qu'on pourra en faire (cf figure 2.26).

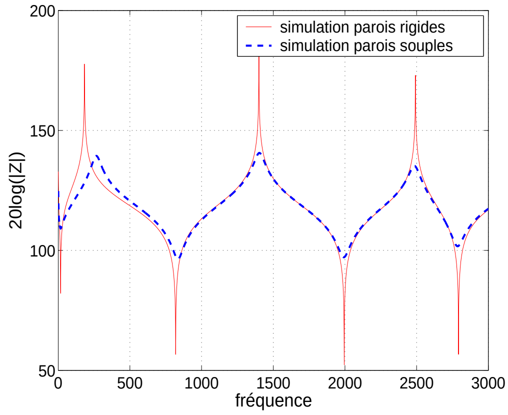


FIG. 2.26 – Comparaison entre les simulations pour des parois rigides et souples (voyelle /æ/).

Examinons maintenant d'un peu plus près les premières résonances et anti-résonances.

<u>Première anti-résonance :</u>
Pour les deux voyelles /æ/ et /i/, la première anti-résonance est donnée par

$$f_1 = \frac{1}{2\pi} \frac{1}{\sqrt{(L_{larynx} + L_{glottis})C_{lungs}}} \tag{2.31}$$

Comme L_{larynx} n'est pas très affectée par la configuration, cette fréquence est quasiment la même pour toutes les configurations, et elle est très grave. En conséquence, pour les fréquences audibles, tout se passe comme si la glotte était ouverte sur un grand espace.

<u>Première résonance :</u>
Dans ce domaine de fréquence (et au-dessus), l'impédance des poumons peut être considérée comme nulle. Cette résonance correspond donc en fait au résonateur de Helmholtz constitué par la glotte et le larynx. Le volume de ce dernier est un peu plus petit pour le /i/ puisqu'il s'arrête au niveau de la constriction palatale alors qu'il se prolonge jusqu'à la bouche pour le /æ/, ce qui explique pourquoi la fréquence de résonance est plus basse pour le /æ/ que pour le /i/.

– configuration /i/ : le circuit équivalent est alors constitué de C_{larynx} en parallèle avec $L_{larynx} + L_{glottis}$. Dans ce cas, nous avons :

$$f_{2i} = \frac{1}{2\pi} \frac{1}{\sqrt{(L_{larynx} + L_{glottis})C_{larynx}}} \quad (2.32)$$

– configuration /æ/ : dans ce cas, L_{palate} est très petite de sorte que C_{larynx} peut être placée avant L_{palate}. Le circuit équivalent est alors $(C_{mouth} + C_{larynx})$ en parallèle avec $(L_{mouth} + L_{larynx} + L_{glottis})$ de sorte que la fréquence d'anti-résonance est par conséquent :

$$f_{2a} = \frac{1}{2\pi} \frac{1}{\sqrt{(L_{palate} + L_{larynx} + L_{glottis})(C_{mouth} + C_{larynx})}} \quad (2.33)$$

Seconde anti-résonance :

– configuration /i/ : Comme L_{palate} est du même ordre que $L_{larynx} + L_{glottis}$, le circuit que nous considérons ici est L_{palate} en série avec le circuit utilisé pour déterminer f_{2i}

$$f_{3i} = \sqrt{\left(\frac{1}{L_{larynx} + L_{glottis}} + \frac{1}{L_{palate}}\right) \frac{1}{C_{larynx}}} \quad (2.34)$$

– configuration /æ/ : De la même manière, L_{mouth} est en série avec le circuit utilisé pour déterminer f_{2a} de sorte que

$$f_{3a} = \sqrt{\left(\frac{1}{L_{larynx} + L_{glottis} + L_{palate}} + \frac{1}{L_{mouth}}\right) \frac{1}{(C_{mouth} + C_{larynx})}} \quad (2.35)$$

Cette seconde anti-résonance correspond pour le /i/ à la résonance du volume du larynx avec deux goulots, la glotte et la constriction palatale. Pour le /æ/, c'est la résonance de l'ensemble larynx et bouche avec deux goulots, la glotte et la bouche.

Elle est approximativement reliée au premier formant de la parole. En effet, l'impédance est nulle ce qui signifie que la pression au niveau de la bouche est nulle, ce qui est quasiment le cas en parole lorsque l'on néglige l'impédance de radiation. De plus, l'impédance à la glotte $j\omega L_{glottis}$ peut être considére comme infinie, ce qui est le cas pour un formant puisque ce dernier est défini par un maximum de la fonction de transfert. Les valeurs numérique du tableau 2.4 doivent être comparées au calcul exact des formants qui donnent 300 Hz pour le /i/ et 710 Hz pour le /æ/. La différence est due aux deux approximations citées précédemment : impédance de rayonnement négligée et implédance de la glotte considérée comme infinie.

Seconde résonance pour /i/ :
Elle est à peu près donnée par la fréquence du circuit parallèle $L_{palate}C_{mouth}$ donc

$$f_{4i} = \frac{1}{2\pi} \frac{1}{\sqrt{L_{palate}C_{mouth}}} \quad (2.36)$$

La constriction palatale est tellement étroite que tout se passe comme si elle débouchait sur un très grand volume à l'arrière. La résonance est alors celle du résonateur de Helmholtz qu'elle constitue avec la bouche. Cette étude nous donne ainsi des indices sur la manière

Fréquences en Hz	Simulation numérique	Impédance électrique : calcul complet	Impédance électrique : Eq. (2.31), (2.32),...
f_1	13	18	14
f_{2i}	236	239	248
f_{2a}	183	188	186
f_{3i}	356	372	381
f_{3a}	819	727	739
f_{4i}	780	927	876

TAB. 2.4 – Valeurs numériques des différentes fréquences (en Hz) de résonance et d'anti-résonance : comparaison entre la simulation complète, par itération sur les différents segments, décrite à la partie précédente moyennant les deux approximations détaillées ci-dessus, la simulation du circuit électrique complet et les approximations simplificatrices de ce circuit .

dont le musicien peut, essentiellement par ajustement de la constriction palatale, modifier l'impédance, puisqu'il est maintenant possible de relier les pics et creux d'impédance aux paramètres géométriques de la configuration du CV.

2.5 Conduit vocal artificiel

Pour le conduit vocal artificiel qui nous permettra l'étude expérimentale du chapitre 4, nous avons choisi les deux fonctions d'aire décrites précédemment : d'une part elles correspondent à deux voyelles souvent citées par les musiciens et d'autre part, elles permettent d'avoir deux cas d'impédance très différentes. Ainsi, l'impédance pour le "ee" sera, au niveau du maximum, du même ordre de grandeur que celle de la clarinette alors que celle du "aw" sera bien inférieure.

Cependant, pour reproduire ces fonctions d'aires sur un conduit vocal artificiel en altuglas (cf 4.2.3), la discrétisation fine du conduit vocal tous les 3.968 mm ainsi que le continuum des aires auraient impliqué un travail de titan pour réaliser tous les disques nécessaires. Nous avons donc décidé d'augmenter le pas de discrétisation à 5 mm et de discretiser les aires. Nous avons choisie une longueur de conduit vocal de 17 cm.

Le tableau 2.5 donne les aires choisies pour chaque segment, pour les deux configurations "aw" et "ee", de la glotte à la bouche, sans tenir compte de la glotte, et le profil des aires est représenté à la figure 2.27.

Leur impédance a été calculée suivant le principe explicité à la partie 2.4 (avec les différentes corrections), excepté que les parois ont été implémentées comme rigides (c'est en effet de l'altuglas !). La première section a été choisie plus large par commodité : nous avons choisi la section circulaire la plus petite permettant d'y positionner le bec sans risque d'accrochage sur les bords de l'anche. Ceci réduit légèrement l'amplitude mais est compensé par le fait que les résonances d'un conduit à parois rigides sont plus fortes que celles d'un conduit à parois souples ce qui donne donc une impédance du même ordre que celle du conduit vocal réel. Les impédances

section	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
"aw"	65	65	30	30	30	30	65	65	65	65	65	65
"ee"	30	30	30	65	150	200	200	200	250	250	300	300

section	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
"aw"	65	65	100	100	150	150	200	200	250	250	300
"ee"	300	300	300	300	250	250	150	150	100	100	65

section	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34
"aw"	350	400	500	600	650	650	650	400	300	200	330
"ee"	65	65	65	65	65	65	100	160	200	200	330

Tab. 2.5 – Fonctions d'aires (en mm^2) pour les voyelles "aw" et "ee", discrétisées tous les 5 mm.

obtenues sont présentées à la figure 2.27.

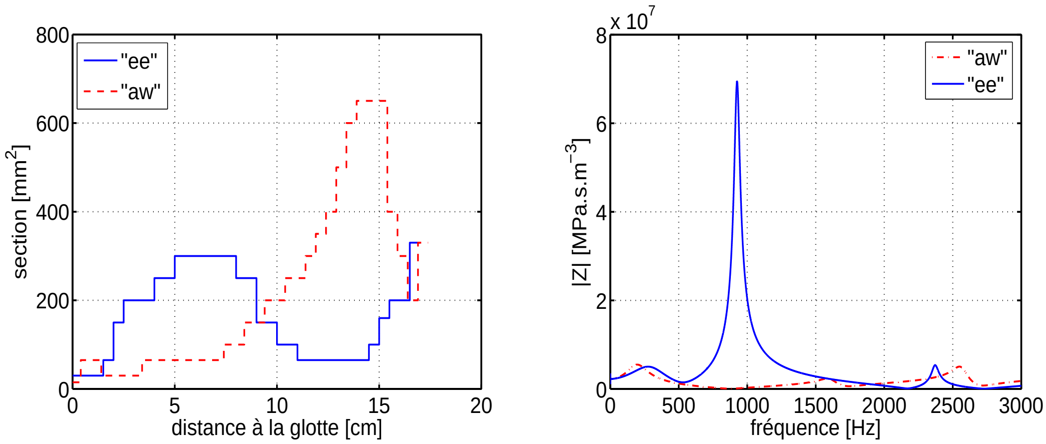


Fig. 2.27 – Fonction d'aires du conduit vocal artificiel en altuglas à gauche et module de son impédance simulée à droite, pour les deux configurations "ee" et "aw", décrites dans le tableau 2.5.

2.6 Incertitude au niveau de la glotte

Même si les clichés de Mukai semblent montrer que la glotte des musiciens professionnels est très fermée, une incertitude réside cependant à ce niveau, ce qui implique une marge d'erreur à la fois sur la résistance glottique (qui par exemple a été ajustée à 1.5 MPa.s.m^{-3} mais uniquement sur les mesures soumises au maping) et sur l'inertance glottique.

La résistance glottique est en fait due à l'écoulement à travers cette fine fente et nous pouvons, à l'image de l'écoulement dans le canal de l'anche, appliquer la relation de Bernoulli. Soient u_t le débit statique à la sortie de la trachée, juste avant la glotte, u' la perturbation de

cet écoulement engendrée par la fente glottique, P_L la pression statique dans les poumons, $\Delta p'$ la perturbation engendrée sur la différence de pression de part et d'autre de la glotte. Alors le débit u_g entrant dans la glotte s'écrit :

$$u_g = u_t + u' = C_v ab\sqrt{\frac{2(P_L + \Delta p')}{\rho}} \simeq C_v ab\sqrt{\frac{2P_L}{\rho}}\left(1 + \frac{\Delta p'}{2P_L}\right) \tag{2.37}$$

où C_v est le coefficient de vena contracta. D'où

$$P_L = \frac{1}{2}\rho\left(\frac{u_t}{C_v ab}\right)^2 \tag{2.38}$$

$$u' = u_t \frac{\Delta p'}{2P_L} \tag{2.39}$$

Et donc la résistance due à l'écoulement à travers la fente glottique vaut :

$$R = \frac{\Delta p'}{u'} = \frac{\rho u_t}{C_v ab} \tag{2.40}$$

Une valeur réaliste du débit u_t est trouvée en considérant que le musicien vide approximativement 4L d'air de ses poumons en 30s ce qui donne $u_t = 1.3 \times 10^{-4}$ m^{3}s^{-1}. D'autre part, en choisissant le coefficient C_v égal à 0.7 et les valeurs de a et b définies au 2.4.2, nous obtenons $R = 1.3$ MPa.s.m^{-3} ce qui est proche de la valeur utilisée pour l'ajustement.

Il était donc important d'avoir pour la fuite dans le bec de mesure une résistance statique comparable à celle de la clarinette afin que les musiciens puissent avoir un débit du même ordre que celui en situation de jeu.

Par ailleurs, la dimension de l'ouverture glottique joue sur l'inertance $L = \frac{\rho e_{eff}}{ab}$ qui peut ainsi varier de 430 Pa.s^2.m^{-3} pour la glotte décrite précédemment à 110 Pa.s^2.m^{-3} pour une glotte plus largement ouverte, de dimensions $a = 18$mm, $b = 5$ mm et $e_{eff} = e = 3$ mm (pas de correction de longueur dans ce cas), qui, d'après Mukai, correspondrait à l'ouverture glottique d'un musicien amateur.

En fait, les variations de L et de R s'effectuent dans le même sens : elles diminuent lorsque l'ouverture de la glotte augmente. La figure 2.28 montre l'effet d'une modification de résistance et d'inertance au niveau de la glotte sur le module de l'impédance dans le cas des deux impédances du conduit vocal artificiel décrites au paragraphe 2.5.

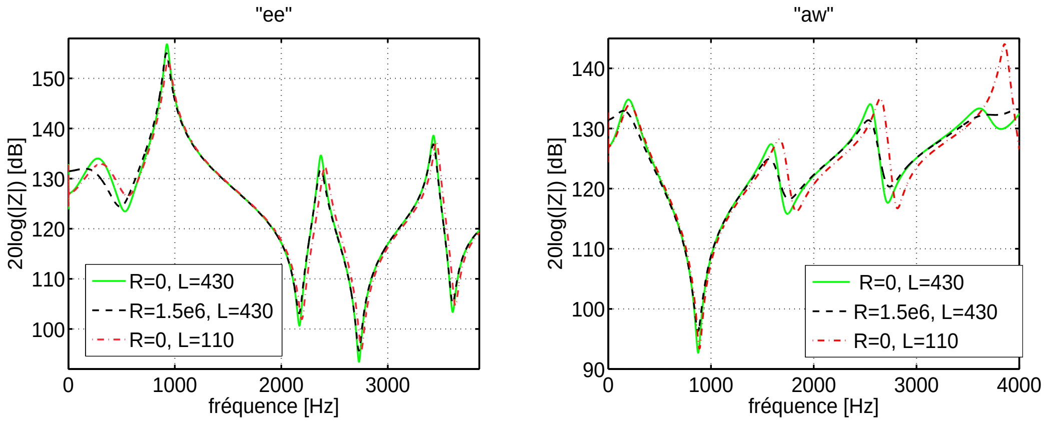


Fig. 2.28 – Influence de l'inertance et de la résistance au niveau de la glotte sur le module de l'impédance du CV.

2.7 Conclusion

Le dispositif de mesure d'impédance du conduit respiratoire des musiciens en quasi situation de jeu nous a donc permis, d'une part de vérifier que le niveau de l'impédance n'est pas toujours négligeable devant celui de la clarinette, en particulier dans des configurations type /i/, et d'autre part d'observer que cette impédance varie suivant les musiciens et les notes à jouer. Ainsi, il est important de relever que bien que les musiciens soient unanimes sur l'importance du conduit vocal, ils le sont beaucoup moins quant aux configurations qu'ils peuvent utiliser. D'autre part, la configuration utilisée par chaque musicien semble à peu près constante sur l'ensemble du registre pour la plupart des musiciens, mais elle peut varier de manière extrême pour des transitions difficiles ou bien des effets un peu spéciaux. Il est malheureusement dommage que la mesure ne puisse se faire en "temps réel" afin de déterminer comment le musicien change sa configuration au cours du temps lors d'une transition ou d'un passage délicats. Il s'est en effet avéré difficile pour les musiciens de tenir sur quelques secondes une configuration qu'ils n'utilisent habituellement que pendant une fraction de seconde lors d'une transition.

Les simulations numériques nous ont surtout servi à retrouver la forme du conduit vocal à partir de la mesure d'impédance dans le but de déterminer deux configurations très différentes (l'une correspondant à une impédance globalement faible, l'autre présentant un pic d'impédance extrêmement marqué) pour le conduit artificiel qui sera utilisé dans le dispositif expérimental du chapitre 4. Il faut cependant garder en mémoire les deux limitations principales. D'une part, ces simulations ont été réalisées avec un modèle unidimensionnel et ne sont donc valables qu'en-dessous de 4000 Hz, fréquence au-delà de laquelle il est indispensable de tenir compte des autres modes de propagation. D'autre part, le passage de l'impédance à la géométrie n'est pas forcément unique et n'a pas toujours donné des résultats vraisemblables.

Chapitre 3

Etude théorique

3.1 Introduction

Après une présentation de la modification, par la prise en compte du conduit vocal du musicien, des équations de la clarinette de la partie 1.2, nous exposons une approche analytique, pour déterminer l'influence du CV (et plus particulièrement l'influence de la partie imaginaire de l'impédance du CV au niveau du deuxième harmonique) sur la fréquence de jeu.

Cette étude analytique mettant en évidence une grande complexité du problème, il apparaît indispensable de faire une étude numérique pour essayer de mieux comprendre comment le CV influe sur les paramètres de jeu, en particulier le seuil d'oscillation, la fréquence de jeu et le spectre . Des simulations numériques ont donc été réalisées à l'aide du programme *Harmbal* (annexe C) sur des tuyaux cylindriques ainsi que sur une clarinette réelle.

3.2 Prise en compte du conduit vocal : modification des équations

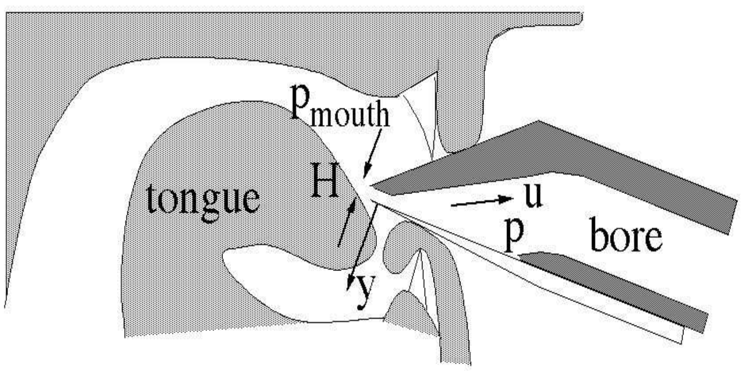


FIG. 3.1 – Système complet instrumentiste/clarinette

La différence induite par le conduit vocal par rapport au modèle présenté dans la partie 1.2 concerne la pression dans la bouche, qui n'est désormais plus considérée comme purement statique :

$$p_{m,tot}(t) = P_{m0} + p_m(t) \tag{3.1}$$

où $p_m(t)$ représente la composante acoustique, supposée périodique.

Alors que les équations (1.4) ou (1.5), (1.6) et (1.7), nous permettent de résoudre le système à trois inconnues (le déplacement de l'anche y, le flux acoustique à travers le canal de l'anche u et la pression dans le bec p_c) dans le cas de la clarinette seule, il nous faut maintenant une équation de plus puisque le système présente une inconnue supplémentaire qu'est la pression acoustique dans la bouche, p_m. Pour cela, nous supposons que le conduit respiratoire du musicien est un résonateur acoustique linéaire, que l'on peut donc caractériser par son impédance d'entrée Z_m. Comme pour définir l'impédance d'entrée, il faut projeter la vitesse sur le vecteur surface entrant, la vitesse est projetée sur des directions opposées pour la définition de Z_c et Z_m, de façon qu'un système passif ait la partie réelle de son impédance positive. Ceci revient en quelque sorte à dire que le débit entrant dans le CV est l'opposé du débit entrant dans la clarinette. Par conséquent, nous pouvons écrire, de manière analogue à (1.6), dans le domaine de Fourier :

$$P_m(\omega) = -Z_m(\omega)U(\omega) \tag{3.2}$$

En combinant les équations (1.6) et (3.2), nous obtenons :

$$\Delta P(\omega) = P_c(\omega) - P_m(\omega) = (Z_c + Z_m)(\omega)U(\omega) = Z(\omega)U(\omega) \tag{3.3}$$

D'autre part, les équation (1.4) et (1.7) deviennent

$$\frac{\mathrm{d}^2 y(t)}{\mathrm{d}t^2} + g_r \frac{\mathrm{d}\, y(t)}{\mathrm{d}t} + \omega_r^2 y(t) = \frac{1}{\mu_r}(\Delta p(t) - P_{m0}) \tag{3.4}$$

$$u = w(H+y)\sqrt{\frac{2|\Delta p - P_{m0}|}{\rho}}\,\mathrm{sgn}(\Delta p - P_{m0}) \tag{3.5}$$

Par conséquent, en remplaçant dans le modèle de la clarinette seule, p_c, P_c et Z_c par, respectivement, $\Delta p = p_c - p_m$, $\Delta P = P_c - P_m$ et $Z = Z_c + Z_m$, les équations restent inchangées lorsque l'on ajoute le conduit vocal. Ceci permet d'utiliser, en tout cas au niveau de la méthode de l'équilibrage harmonique, le même outil de simulation, *Harmbal* , à la différence près que ce sera Δp et non p_c qui sera calculé. La déduction de p_c et p_m est ensuite évidente. Ce qui est simple sur papier ne l'est cependant pas toujours autant en programmation et de nombreuses modifications ont ainsi dû être implémentées dans ce programme (ce qui est détaillé dans la deuxième partie de l'annexe C) pour obtenir les mêmes fonctionnalités avec le CV que sans. Le principal problème a résidé dans le fait qu'il n'est pas possible d'utiliser une impédance analytique pour le CV comme on peut le faire pour la clarinette en l'approximant par un tuyau cylindrique.

Il est important de relever que le CV n'intervient en réalité pas uniquement par sa seule impédance. Ainsi, un changement de configuration par le musicien entraîne nécessairement une modification de la "pince". Ceci conduit à une variation de la pression de la lèvre sur l'anche

ainsi que de la longueur vibrante de l'anche et a donc pour effet de modifier l'amortissement g_r et la résonance ω_r de l'anche. Le musicien, en contrôlant la configuration du CV, joue ainsi simultanément sur différents paramètres, non indépendants. Nous nous intéresserons cependant ici qu'à l'influence de l'impédance du résonateur amont et considérerons les paramètres propres à l'anche comme constants.

Un autre point important à noter est que nous considérons toujours, à l'instar de la clarinette seule, la source de pression acoustique dans la bouche, c'est-à-dire que P_{m0} est supposée constante, à la différence de l'étude de Sommerfeldt et Strong [83] où la source de pression est choisie au niveau des poumons. L'avantage de ce choix est de modéliser au mieux les situations expérimentales présentées au chapitre 4 : c'est en effet la pression statique dans la bouche que nous contrôlons dans la bouche artificielle. D'autre part, la pression dans la bouche n'est que légèrement plus faible que la pression dans les poumons. En effet, si nous écrivons rigoureusement les équations, nous avons :

$$P_{ct} = Z_c U_t \quad (3.6)$$
$$P_{mt} = P_L - Z_m U_t \quad (3.7)$$

où l'indice t caractérise les grandeurs totales, incluant composante statique (prise à fréquence nulle) et composante oscillante, caractérisée ci-après par l'indice o, et P_L est la pression dans les poumons. D'où

$$\Delta P_t = P_{ct} - P_{mt} = (Z_c + Z_m)U_t - P_L \quad (3.8)$$
$$= (Z_c + Z_m)U_o - [P_L - (Z_c + Z_m)(0)U(0)] \quad (3.9)$$
$$= (Z_c + Z_m)U_o - P_{m0} \quad (3.10)$$

et donc

$$\Delta P_o = (Z_c + Z_m)U_o \quad (3.11)$$
$$P_{m0} = P_L - (Z_c + Z_m)(0)U(0) \quad (3.12)$$

Or dans nos équations précédentes, $\Delta P(\omega)$ était par notation la composante oscillante de la différence de pression, et est donc égale à ΔP_o, ainsi que $U(\omega)$ est égal à U_o. Nous en déduisons donc, grâce à (3.12), que la pression statique dans la bouche est diminuée par rapport à la pression dans les poumons de la quantité $(Z_c + Z_m)(0)U(0)$. Or l'impédance de la clarinette est nulle à fréquence nulle et celle du conduit vocal reste faible d'après nos simulations, même en considérant la résistance de la glotte, de sorte que nous pouvons négliger ce terme en première approximation et considérer que choisir la source dans la bouche est quasiment équivalent à la choisir dans les poumons.

Puisque les impédances du CV et de la clarinette sont en série, il est intéressant de commencer par une comparaison de ces deux impédances afin d'examiner si nous pouvons déjà prédire qualitativement quelques effets.

3.3 Influence qualitative du conduit vocal

Les impédances du CV et de la clarinette étant en série, nous pouvons présager des effets si l'impédance du CV est du même ordre de grandeur que celle de la clarinette, c'est-à-dire si les pics du CV peuvent renforcer ou entrer en concurrence avec les pics de la clarinette. Ainsi, nous pouvons imaginer qu'une configuration "aw" telle que décrite à la section 2.4.5 ne produira pas beaucoup d'effet alors qu'une configuration "ee" va certainement agir sur les harmoniques supérieurs. Ainsi, d'après la figure 3.2, on aurait tendance à dire que la configuration "ee" va renforcer le troisième harmonique[1] de la note G4 et légèrement le cinquième de la note G3.

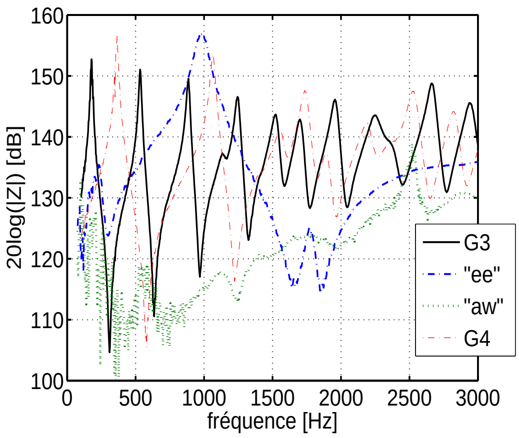


FIG. 3.2 – Impédances mesurées de la clarinette pour les notes G3 et G4, et pour le CV en configuration "ee" et "aw" (ces deux configurations sont celles décrites dans la partie 2.4.5 et ont été mesurées sur deux musiciens).

D'autre part, d'après cette figure, les pics de la clarinette sont plus élevés pour les notes à tuyau court qu'à tuyau long de sorte que nous nous attendrions à un effet du CV plus important pour les tuyaux longs que pour les tuyaux courts, ce qui serait contraire à l'expérience des musiciens.

De plus, la fréquence de coupure de la clarinette, étant de l'ordre de 2000 Hz, l'importance du CV se situera surtout au niveau des harmoniques inférieurs, dans la bande [100 Hz, 1500 Hz].

Enfin, l'impédance du CV aura somme toute une influence limitée sur les pics mais certainement pas sur les creux où l'impédance du CV peut être bien supérieure à celle de la clarinette. Ceux-ci risquent ainsi de devenir inharmoniques et il sera intéressant de voir l'effet induit sur la fréquence. Ce cas est propre à la clarinette pour laquelle les harmoniques pairs ne correspondent pas à un maximum d'impédance, contrairement au saxophone.

Il est bien évident cependant que la phase intervient et qu'ajouter les impédances ne revient pas à ajouter leurs modules ! Il est cependant intéressant de voir si ces premières prédictions

[1]La notation des harmoniques utilisée dans cette thèse se fait suivant la terminologie française : le $n^{\text{ième}}$ harmonique correspond à l'harmonique de fréquence n fois celle du fondamental (harmonique 1).

qualitatives, voire intuitives, vont s'avérer vraies théoriquement puis expérimentalement.

Nous allons donc maintenant passer à une étude théorique de l'effet du CV sur la fréquence. Pour réaliser cette étude, nous nous placerons tout d'abord dans un cas simplifié, en ne gardant que les trois premiers harmoniques, afin de pouvoir résoudre analytiquement le problème, dans le but d'obtenir des interprétations simples.

3.4 Description du système théorique

Le système théorique simulant le CV et la clarinette qui sera utilisé dans tout ce chapitre a été construit suivant deux objectifs :

- avoir une version simplifiée du système pour espérer aboutir à des résultats analytiques exploitables et permettant une interpréation des phénomènes
- avoir une simulation du système réel, afin de pouvoir comparer ensuite les expériences réalisées au chapitre 4 aux résultats théoriques, tout en gardant à l'esprit les différentes simplifications qui auront été faites.

La première simplification est de considérer, dans la plupart des cas, une anche sans masse ni amortissement. La clarinette, quant à elle, sera modélisée dans son ensemble (y compris le bec) par un tuyau cylindrique, décliné en trois longueurs afin de simuler différentes notes de la clarinette, correspondant à différentes "longueurs" de tuyaux : G3 ("tuyau long", $f_c = 177$ Hz), C4 ("tuyau moyen", $f_c = 240$ Hz) et G4 ("tuyau court", $f_c = 355$ Hz), sachant que plus le tuyau est court, plus il est facile de modifier la note avec le CV d'après les musiciens. Cependant, ceci est très certainement dû au fait que pour les "tuyaux courts", l'impédance ne comporte que deux pics harmoniques. Pour vérifier ceci, nous utiliserons deux impédances pour le G4 : la première pourrait être qualifiée de "normale", avec un nombre de pics "infini", l'autre est tronquée après le troisième harmonique (cf figure 3.3). D'autre part, nous étudierons les deux configurations "ee" et "aw" telles qu'elles sont implémentées dans le conduit vocal artificiel (partie 2.5) et nous utiliserons leurs impédances simulées (avec des parois rigides, pour pouvoir comparer la théorie aux valeurs expérimentales obtenues avec la bouche artificielle), représentées à la figure 3.3.

La figure 3.3 est en fait le pendant théorique de la figure 3.2 correspondant au cas réel que l'on cherche à simuler.

3.5 Etude analytique à trois harmoniques, près du seuil

Pour cette étude près du seuil, nous utiliserons, à l'instar de la méthode de résolution dite à troncature variable (cf partie C.1.3 et [59]), le développement polynômial d'ordre 3 décrit par l'équation (C.15) pour la fonction non linéaire, commode pour une étude analytique. Nous y remplacerons bien évidemment P par ΔP. Toute cette étude est réalisée avec des grandeurs adimensionnées. L'adimensionnement de l'impédance totale $Z = Z_c + Z_m$ se fait par rapport à l'impédance caractéristique de la clarinette.

De plus, les résultats analytiques seront comparés aux simulations réalisées avec *Harmbal.*

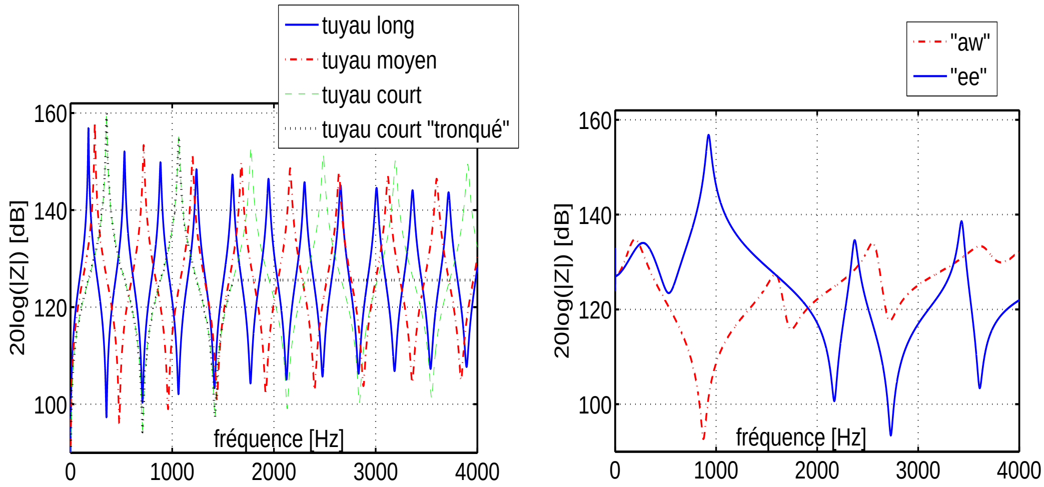


FIG. 3.3 – Module des impédances de la clarinette (assimilée à un tuyau cylindrique), à gauche, et du conduit vocal, à droite, pour notre étude

Les paramètres de l'anche M et R (cf partie C.1.2) ont été choisis nuls puisque nous avons décidé de considérer une anche sans masse ni amortissement. Le paramètre d'embouchure a été choisi pour correspondre en moyenne aux valeurs trouvées expérimentalement (cf partie 4.3) soit $\zeta = 0.25$. La fonction non-linéaire utilisée est la fonction complète issue de la relation de Bernoulli (et non le polynôme d'ordre 3). Le nombre d'harmoniques est choisi égal à 31, pour simuler un cas réel, où ce nombre est grand.

Pour une anche non battante, on applique la méthode de troncature variable [59], qui consiste à calculer de manière itérative l'harmonique n en tronquant les équations au $n^{\text{ième}}$ harmonique et en considérant que les $(n-1)$ précédents harmoniques ne sont que peu modifiés par le $n^{\text{ième}}$. Cette méthode peut s'appliquer à toutes les équations régissant le système, et en particulier à la formule de la puissance réactive développée par Boutillon et Gibiat [13] pour déterminer la fréquence de jeu. En s'arrêtant au troisième harmonique, on obtient

$$Im(Y_1)|\Delta P_1|^2 + 2Im(Y_2)|\Delta P_2|^2 + 3Im(Y_3)|\Delta P_3|^2 = 0 \tag{3.13}$$

où Y_i représente la valeur de l'admittance totale du système clarinette-CV ($Y = 1./Z$) pour le $i^{\text{ième}}$ harmonique.

Au niveau du seuil, la fréquence de jeu est égale à la fréquence pour laquelle $Im(Y_1) = 0$ soit f_o, légèrement différente de la première fréquence de résonance de la clarinette f_c. L'admittance au seuil est notée Y_1^0 (réelle). Lorsqu'on augmente le nombre d'harmoniques et la pression dans la bouche, la fréquence de jeu change légèrement. On peut alors écrire :

$$f = f_o(1+\epsilon) \tag{3.14}$$

Dans ce cas,

$$Y_1 = Y_1^0 + j\frac{\pi}{2}\epsilon \tag{3.15}$$

d'où

$$\epsilon = -\frac{2}{\pi}\left(2Im(Y_2)|X_2|^2 + 3Im(Y_3)|X_3|^2\right) \tag{3.16}$$

avec $X_2 = \Delta P_2/\Delta P_1$ et $X_3 = \Delta P_3/\Delta P_1$.

Cependant, $Im(Y_3)$ étant très inférieur à $Im(Y_2)$, il s'avère que, dans la plupart des cas (cf figure 3.4), le deuxième terme n'influence guère l'évolution de la fréquence et nous pouvons simplifier l'équation (3.16) en :

$$\epsilon = -\frac{4}{\pi} Im(Y_2)|X_2|^2 \tag{3.17}$$

Cette équation permet donc facilement de déterminer le sens de variation de la fréquence : il est opposé au signe de la partie imaginaire de l'admittance au niveau du deuxième harmonique. Ainsi, suivant que ce deuxième harmonique est avant ou après un pic de conduit vocal, nous pouvons obtenir des variations de fréquence aussi bien positives que négatives.

Si l'on veut connaître un peu mieux l'ordre de grandeur de cette variation, il faut donc maintenant déterminer X_2. Notre intuition[2] est que, contrairement au cas de la clarinette seule, le deuxième harmonique n'est plus négligeable dans le calcul des harmoniques impairs en raison du CV. Nous allons modifier la méthode de Kergomard *et coll*, développée dans [59], de la manière suivante :

- nous tenons compte du deuxième harmonique dans le calcul ΔP_1, c'est-à-dire qu'au lieu de tronquer les équations à $N = 1$, nous tronquons à $N = 2$.
- puis nous tenons compte également du deuxième harmonique dans le calcul troisième harmonique : nous conservons la valeur trouvée précédemment pour ΔP_1, mais pas celle de ΔP_2.

Ceci nous permet ainsi d'avoir à résoudre deux systèmes à deux inconnues, au lieu d'un système à trois inconnues.

En fait, la méthode de troncature variable est modifiée dans le but de supprimer la simplification que les harmoniques pairs peuvent être calculés après coup, à partir des harmoniques impairs, afin de prendre en compte l'influence de ΔP_2 à la fois sur ΔP_1 et sur ΔP_3. En revanche, nous considérons toujours que ΔP_1 reste peu influencé par ΔP_3.

Par ailleurs, nous adoptons les mêmes simplifications concernant l'ordre d'approximation : il est égal à l'ordre de la troncature. Ainsi par exemple, pour le calcul de ΔP_1, nous nous limitons à l'ordre 2 en ΔP_1, ce qui implique que nous négligeons les termes en p_2^2 puisque nous supposons que le théorème de Worman [97] reste valable en présence du CV et que donc ΔP_2 est du deuxième ordre en ΔP_1.

Enfin, nous utilisons la même convention de choisir la phase du premier harmonique nulle de sorte que ΔP_1 est réel [3].

Pour le calcul de ΔP_1, les équations sont donc les suivantes :

$$(Y_1 - A)\Delta P_1 = 2B\Delta P_2 \Delta P_1 + 3C\Delta P_1^3 \tag{3.18}$$
$$(Y_2 - A)\Delta P_2 = B\Delta P_1^2 \tag{3.19}$$

[2]Elle sera justifiée a posteriori en comparant les résultats obtenus avec les simulations de *Harmbal*.

[3]Le choix d'une origine des temps étant en effet arbitraire, la phase d'un des harmoniques peut être choisie arbitrairement.

D'où

$$\Delta P_1^2 = \frac{(Y_1 - A)(Y_2 - A)}{2B^2 + 3C(Y_2 - A)} \tag{3.20}$$

Pour le calcul de ΔP_2 et ΔP_3, le système à résoudre est :

$$(Y_2 - A)\Delta P_2 = B\Delta P_1^2 + 2B\Delta P_1 \Delta P_3 \tag{3.21}$$

$$(Y_3 - A)\Delta P_3 = 2B\Delta P_1 \Delta P_2 + C\Delta P_1^3 + 6C\Delta P_1^2 \Delta P_3 \tag{3.22}$$

d'où nous en déduisons, après calcul, les rapports $X_i = \Delta P_i / \Delta P_1$:

$$X_3 = \frac{2B^2 + C(Y_2 - A)}{\frac{(Y_2-A)(Y_3-A)}{\Delta P_1^2} - 2(2B^2 + 3C(Y_2 - A))} \tag{3.23}$$

$$X_2 = \frac{B\Delta P_1}{Y_2 - A}(1 + 2X_3) \tag{3.24}$$

avec ΔP_1 déterminé par l'équation (3.20). Nous obtenons ainsi

$$X_3 = \frac{2B^2 + C(Y_2 - A)}{2B^2 + 3C(Y_2 - A)} \frac{Y_1 - A}{A + Y_3 - 2Y_1} \tag{3.25}$$

ce qui permet facilement une comparaison avec la formule (18a) obtenue par Kergomard *et coll.* : nous n'avons pas négligé le terme $2B^2$ de sorte que la première fraction ne peut être réduite à 1/3.

De plus, nous supposons que lorsque la fréquence varie, les admittances restent constantes égales à leur valeur au seuil (notées par l'exposant zéro). Par conséquent, la variation de fréquence vaut :

$$\epsilon = -\frac{4}{\pi} Im(Y_2) \left| \frac{B^2(Y_1^0 - A)}{(Y_2^0 - A)(2B^2 + 3C(Y_2^0 - A))} \right| |1 + 2X_3|^2 \tag{3.26}$$

Cette formule n'est malheureusement pas facilement exploitable, et seule une résolution numérique permet, à partir de la donnée des admittances au seuil au niveau des trois premiers harmoniques, d'obtenir la variation de la fréquence de jeu lorsque la pression dans la bouche augmente. En revanche, cette formule, d'après la figure 3.4 permet une estimation tout à fait correcte de l'évolution de la fréquence.

Les figures 3.5 et 3.6 permettent de justifier a posteriori la méthode utilisée pour déterminer les différents harmoniques puisque les résultats obtenus ne s'éloignent qu'assez peu des résultats de *Harmbal*.

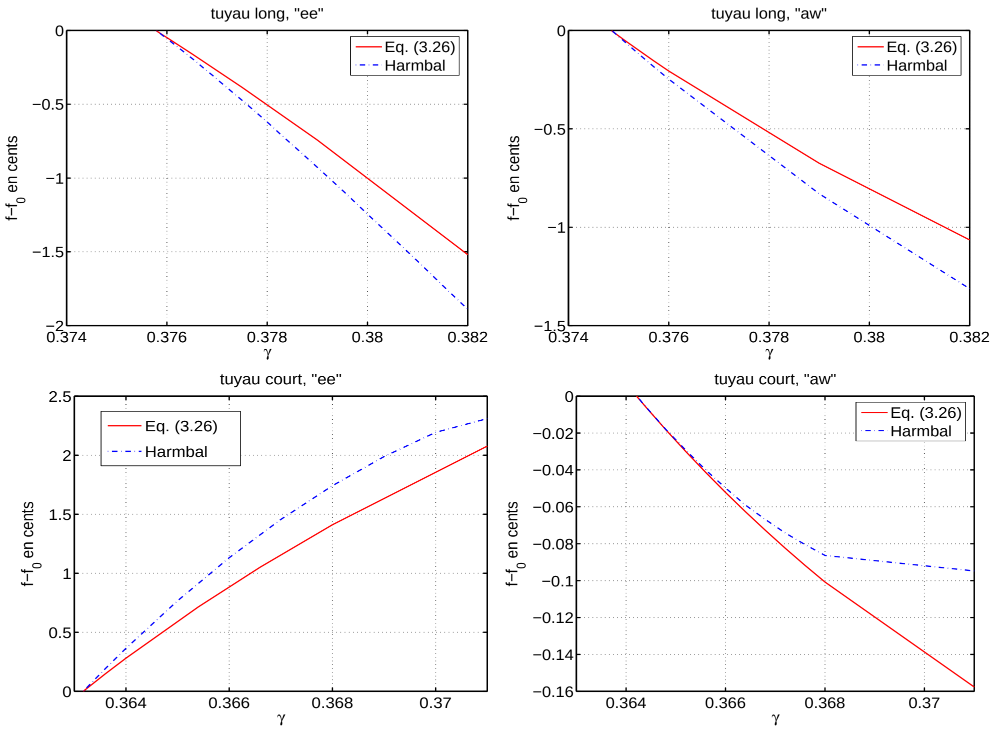


Fig. 3.4 – Evolution de la fréquence de jeu en fonction de la pression dans la bouche, à partir du seuil d'oscillation : comparaison entre l'équation (3.26) et *Harmbal* (31 harmoniques).

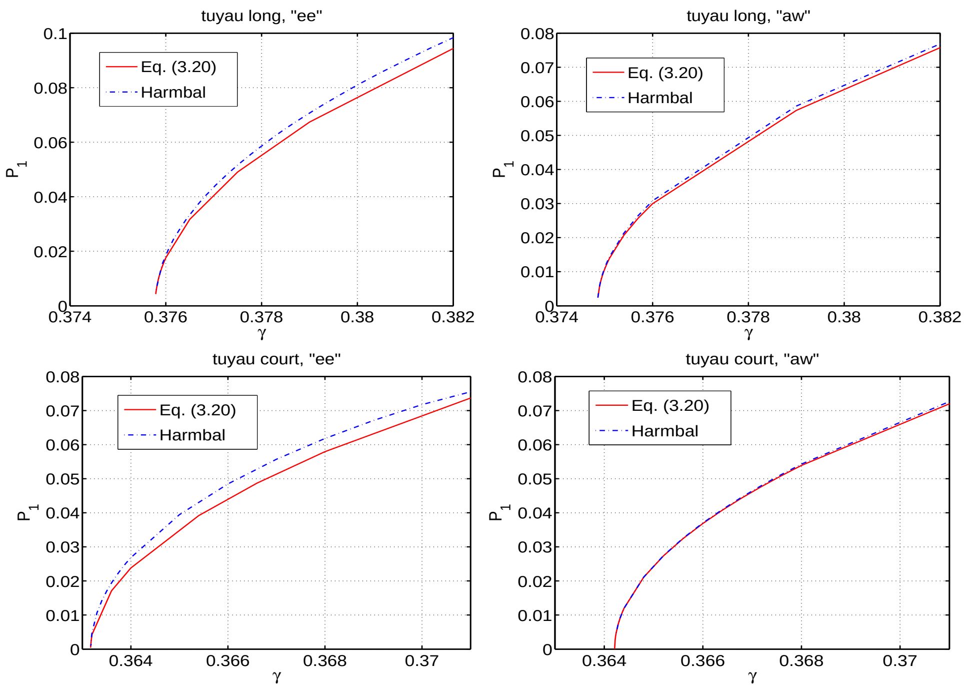


Fig. 3.5 – Variation de l'amplitude du premier harmonique (réel) en fonction de la pression dans la bouche : comparaison entre l'équation (3.20) et *Harmbal* (31 harmoniques).

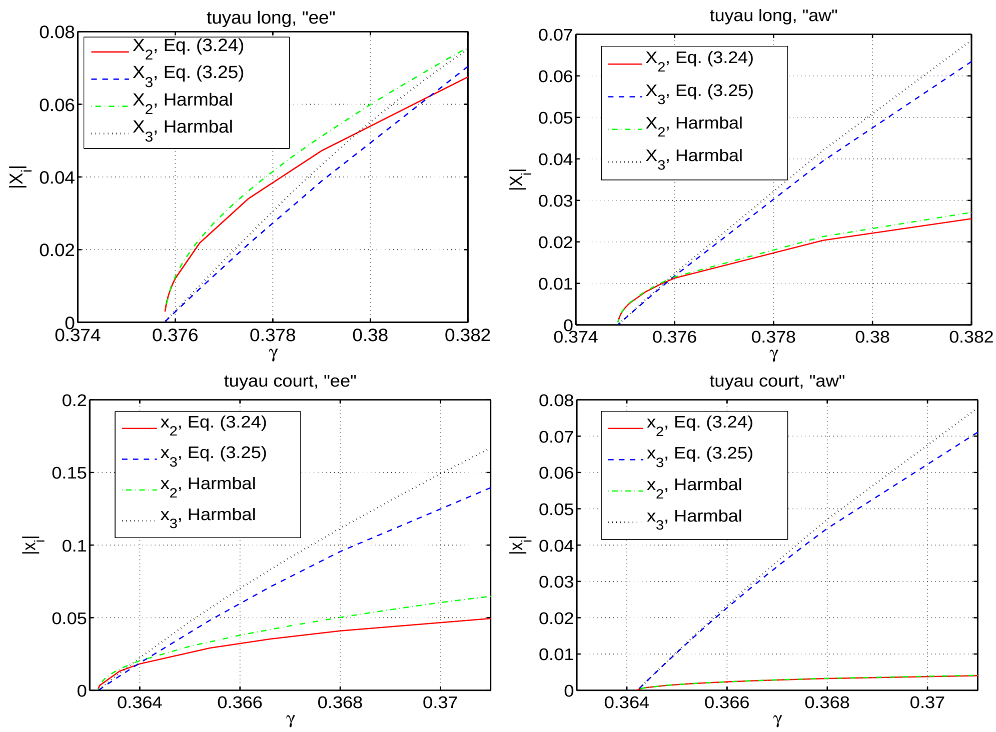


FIG. 3.6 – Variation des rapports $|X_2|$ et $|X_3|$ en fonction de la pression dans la bouche : comparaison entre l'équation (3.25) pour X_3 et l'équation (3.23) couplée avec les équations (3.25) et (3.20), et *Harmbal* (31 harmoniques).

Il est intéressant de constater que le CV "ee" a des influences contraires sur la fréquence des tuyaux long et court. Ceci est dû à la place de l'harmonique 2, pour chacun de ces tuyaux par rapport aux résonances du CV. Ainsi, la figure 3.7 nous montre qu'effectivement l'harmonique 2 du tuyau court se situe dans une région où la partie imaginaire de l'admittance du CV est négative alors que celui du tuyau long se situe dans une région où elle est positive. En connaissant la fréquence du tuyau sans CV, on peut ainsi déterminer si le deuxième harmonique correspond à une fréquence où la partie imaginaire de l'admittance est positive ou négative et inversement, et par conséquent en déduire le sens de variation de la fréquence de jeu près du seuil. Ainsi, pour le tuyau moyen, de fondamentale 240 Hz, le deuxième harmonique se situe vers 480 Hz et donc correspond à une partie positive de l'impédance du CV. De ce fait, nous pouvons prédire, pour ce tuyau moyen, une variation négative de la fréquence de jeu lorsque la pression dans la bouche augmente.

Par ailleurs, il faut noter les ordres de grandeur de la variation de fréquence. Elle s'avère en fait imperceptible pour l'oreille humaine dans cette plage de pression buccale puisque la plus petite différence perceptible est d'environ 4 cents. Par conséquent, près du seuil, nous ne pouvons percevoir de différence entre les configurations de CV "ee" et "aw".

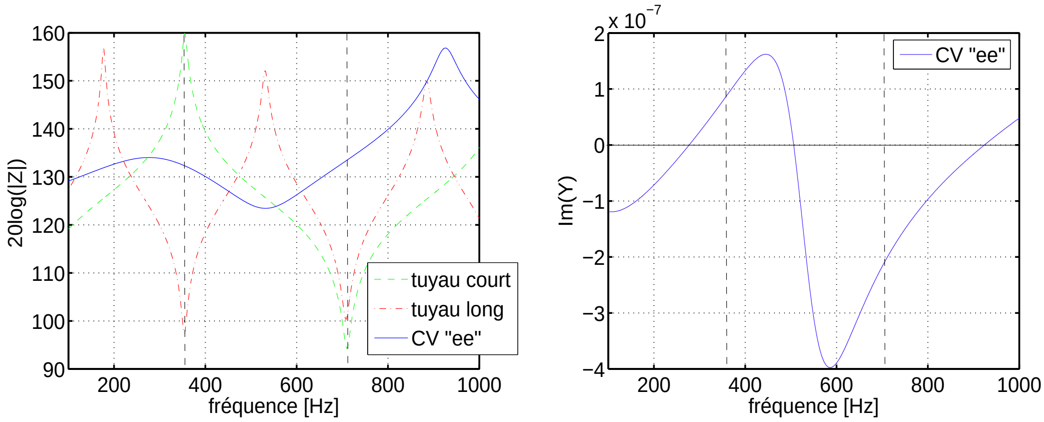


Fig. 3.7 – Module de l'impédance (non adimensionnée) du CV "ee", du tuyau long et du tuyau court à gauche et partie imaginaire de l'admittance (non adimensionnée) du CV "ee" à droite.

Enfin, un dernier point à remarquer est la valeur de la pression dans la bouche au seuil. Celle-ci est déterminée par $A_{seuil} = Y_1^0$ et donc plus l'admittance au niveau de la première fréquence de résonance du tuyau est grande et plus A_{seuil} est grand, et donc plus γ_{seuil} est grand (d'après (C.16)). D'après la figure 3.8, pour le tuyau long, la partie réelle de l'impédance est plus grande

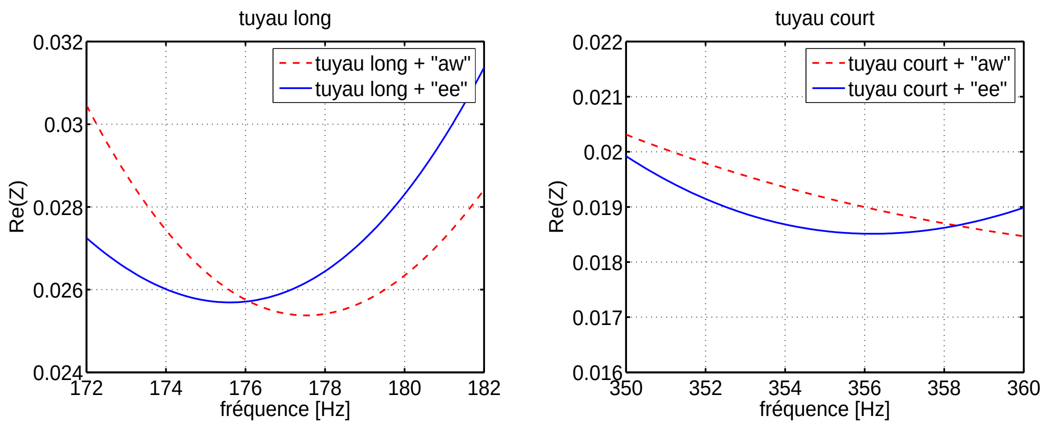


Fig. 3.8 – Partie réelle de l'admittance totale (adimensionnée) du CV et du tuyau cylindrique, pour le tuyau long à gauche et le tuyau court à droite, pour les deux configurations "ee" et "aw", au voisinage de la première fréquence de résonance de chaque tuyau.

pour la configuration "ee" que la configuration "aw" pour une fréquence de 177 Hz. C'est en revanche le contraire pour le tuyau court, de fondamentale 355 Hz. Ceci confirme ainsi ce que nous pouvons observer sur la figure 3.4 : la configuration "ee", par rapport à la configuration "aw", abaisse la pression de seuil dans la bouche pour le tuyau court mais l'augmente pour le tuyau long.

De nombreuses autres pistes ont été explorées par Matthias Demoucron [22], lors de son stage de DEA que j'ai encadré, dans le but d'améliorer (3.26), mais aucune formule ne s'est révélée facile d'utilisation et valable plus loin du seuil et/ou pour un grand nombre d'harmoniques.

La conclusion est donc que, mis à part le sens de variation de la fréquence au seuil ainsi que l'abaissement ou non de la pression de seuil, rien ne peut être prédit analytiquement en raison de la complexité du problème. Seules des simulations numériques peuvent permettre d'estimer les effets du CV, dans tout le régime d'anche non battante, et pour un nombre important d'harmoniques. De plus, elles permettent également de pouvoir introduire ce que nous avons négligé ici : la dispersion ainsi que la masse et l'amortissement de l'anche.

3.6 Simulations avec *Harmbal*

Nous nous intéressons maintenant à tout le régime anche non battante. Nous étudierons dans un premier cas l'influence des deux configurations sur le son de différents tuyaux cylindriques avant de comparer les effets à ceux de la dispersion ou de la prise en compte de la masse et de l'amortissement de l'anche puis de réaliser quelques simulations à l'aide d'impédances mesurées de clarinette.

Il est bien évident que les musiciens utilisent en pratique différentes configurations de CV et que cette étude ne se veut donc pas exhaustive. Elle a plutôt pour but de comparer deux configurations extrêmes afin d'essayer d'obtenir quelques conclusions qualitatives.

Le modèle unidimensionnel n'ayant plus de sens au-dessus de 4000 Hz, nous nous limiterons aux fréquences inférieures à 4000 Hz ce qui limite le nombre maximal d'harmoniques pour lequel peuvent être calculées les solutions (par exemple 11 pour le tuyau court, 15 pour le tuyau moyen et 21 pour le tuyau long).

De plus, nous conservons la valeur de ζ à 0.25 et ne tiendrons pas compte, dans les sous-parties 3.6.1 et 3.6.3 de la masse et de l'amortissement de l'anche, ainsi que nous l'expliquerons au 3.6.2.

3.6.1 Les différents tuyaux

En plus des quatre tuyaux décrits à la partie 3.4, soit les tuyaux long, moyen, court et court "tronqué", nous avons également étudié un tuyau court "amorti", qui correspond à un tuyau de même longueur que le tuyau court avec un paramètre de pertes η égal à celui du tuyau long, ce qui revient à étudier l'effet d'une impédance plus grande de CV. Un tableau récapitulatif des différents tuyaux et impédances utilisés est donné en annexe B.

Fréquence de jeu

L'évolution de la fréquence de jeu (figure 3.9) pour les différents tuyaux, en fonction de P_{m0}, suivant les deux configurations de conduit vocal, suscite plusieurs remarques.

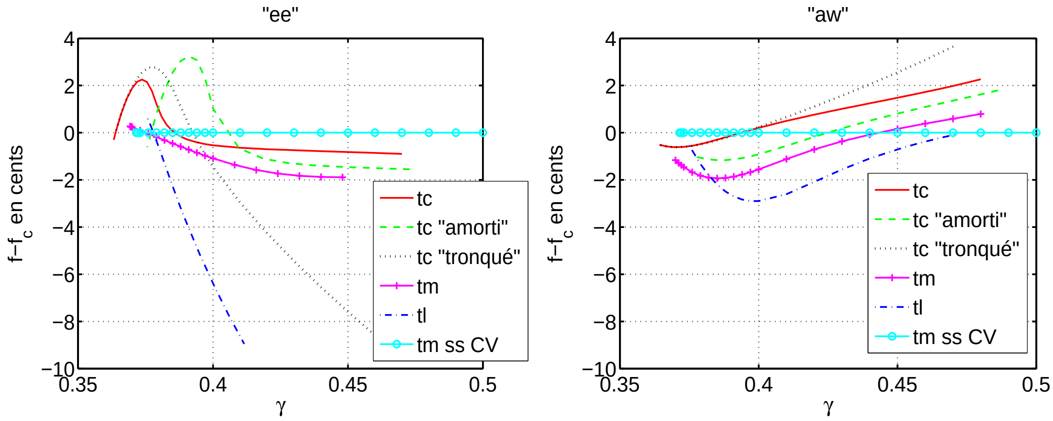


Fig. 3.9 – Différence en cents entre la fréquence de jeu et la première fréquence de résonance du tuyau f_c en fonction de la pression dans la bouche adimensionnée γ, pour les différents tuyaux : configuration "ee" à gauche et "aw" à droite (même échelle).

Commençons par les remarques facilement interprétables.

La première confirme notre intuition : le "aw", d'impédance bien plus faible que le "ee", a moins d'effet puisque son impédance ne modifiera que peu l'impédance de la clarinette.

La deuxième est tout aussi intuitive : l'effet est plus grand pour le tuyau court "amorti" que pour le tuyau court "normal" puisque son impédance est plus faible et donc l'impédance du CV est relativement plus grande.

La troisième concerne les seuils. La pression dans la bouche au seuil d'oscillation est, sans CV, bien approximée par $\gamma_{seuil} = \frac{1}{3} + 0.5\frac{\eta}{\zeta}$ et donc nous nous attendons à retrouver à peu près le même seuil pour des tuyaux de même η, soit le tuyau long et le tuyau court "amorti" ce qui est bien le cas sur les deux graphes de la figure 3.9.

Passons maintenant aux remarques que seule une analyse numérique permet.

L'effet du CV sur la variation de fréquence n'est pas toujours monotone, et donc à forte P_{m0}, ne peut pas du tout être prédit par une analyse analytique au seuil telle que celle décrite au 3.5. Le changement de sens de variation apparaît pour un γ où les harmoniques supérieurs ne sont plus négligeables et influencent les trois premiers. Ainsi, nous pouvons constater que, pour la configuration "ee", alors que la fréquence se stabilise sur un palier pour le tuyau court vers $\gamma \simeq 0.39$, elle continue à décroître pour le tuyau court tronqué, pour lequel les harmoniques supérieurs sont quasiment nuls.

Le fait que les harmoniques supérieurs jouent un rôle important, et rendent de ce fait les interprétations extrêmement difficiles, se voit en particulier bien sur la figure 3.10 où la fréquence de jeu, fonction de P_{m0}, est calculée par *Harmbal* pour différents nombres d'harmoniques pris en compte.

A propos de l'amplitude des variations de fréquence entre deux configurations de CV, seules les variations observées sur le tuyau long et le tuyau court tronqué peuvent être perceptibles

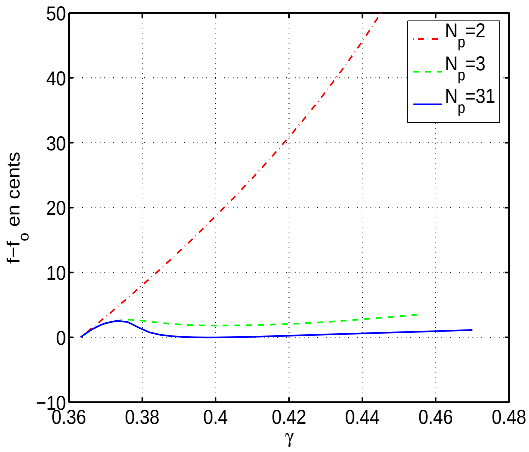


Fig. 3.10 – Fréquence de jeu en fonction de γ pour le tuyau court et la configuration "ee", calculée par *Harmbal* pour différents nombres d'harmoniques N_p.

lorsque γ commence à devenir grand : il y a par exemple une différence de 10 cents entre le “ee” et le “aw” pour le tuyau court tronqué, à $\gamma = 0.45$. Ainsi, les deux configurations de CV ne pourront être différenciées, par une oreille humaine, que pour ces deux tuyaux, du moins en ce qui concerne la fréquence de jeu. D'autre part, la plus grosse variation entre les deux CV est observée pour le tuyau court tronqué, soit pour un tuyau court de clarinette ce qui confirme l'opinion des musiciens. Ceci nécessite cependant d'être confirmé avec des impédances de clarinette, pour différentes notes.

Intéressons-nous maintenant au spectre pour étudier d'une part si nos intuitions du paragraphe 3.3 sont vérifiées et d'autre part si les différences engendrées par les deux configurations de CV peuvent être musicalement perceptibles.

Spectre dans le bec

Nous présentons ici le spectre de la pression dans le bec, et non celui de la différence de pression de part et d'autre de l'anche, qui sert uniquement dans la boucle de calcul de *Harmbal* sans présenter de grand intérêt pour le musicien.

Nous utilisons dans tout ce paragraphe la notation usuelle $x_i = P_{ci}/P_{c1}$ qui représente le rapport entre la pression dans le bec pour l'harmonique i et celle pour l'harmonique 1.

Les figures 3.12 à 3.15 donnent les rapports x_i pour les différents tuyaux, pour chacune des deux configurations “ee” et “aw”. Pour bien visualiser les effets engendrés par le CV, il est nécessaire d'avoir également les courbes dans la configuration sans conduit vocal. Sachant que ces courbes pour les trois tuyaux ne diffèrent approximativement l'une de l'autre que par une translation suivant l'axe des abscisses, nous n'avons représenté que celle du tuyau moyen (ainsi celle du tuyau court s'en déduit d'une translation vers des γ plus faibles et inversement pour le tuyau long).

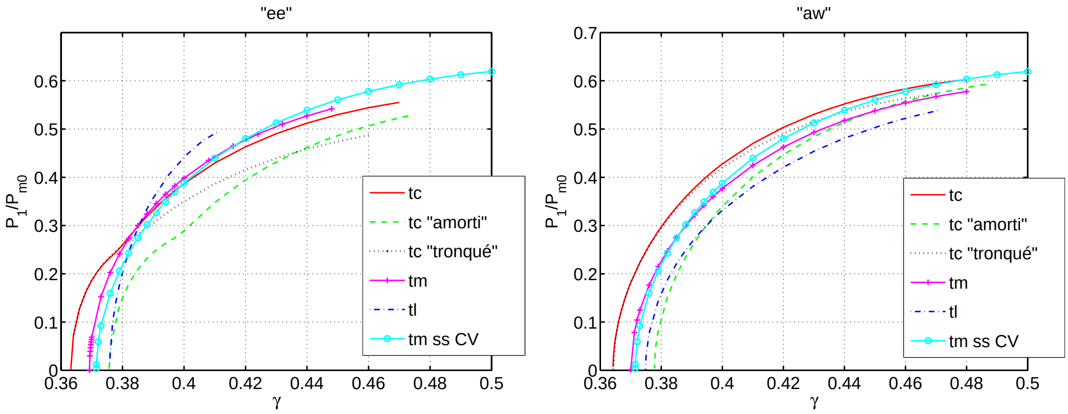


FIG. 3.11 – Module de P_1/P_{m0} en fonction de la pression dans la bouche γ pour les différents tuyaux : configuration "ee" à gauche et "aw" à droite (même échelle et même légende).

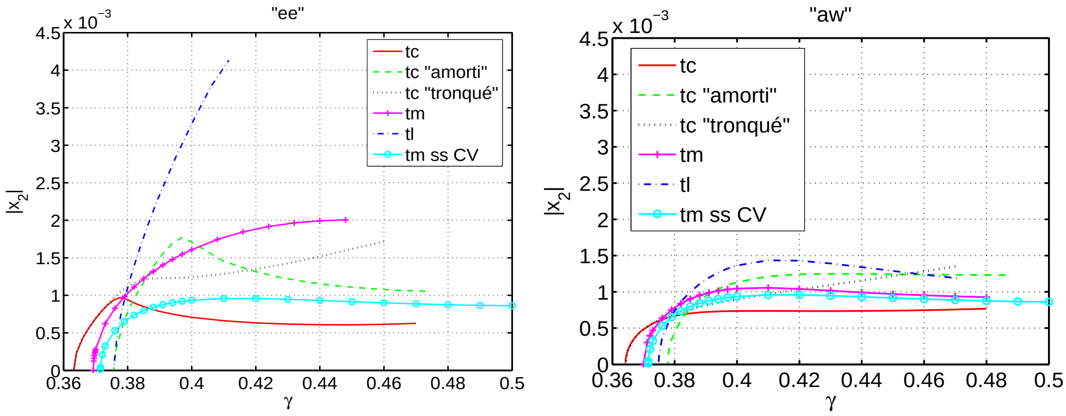


FIG. 3.12 – Module de x_2 en fonction de la pression dans la bouche pour les différents tuyaux : configuration "ee" à gauche et "aw" à droite (même échelle et même légende).

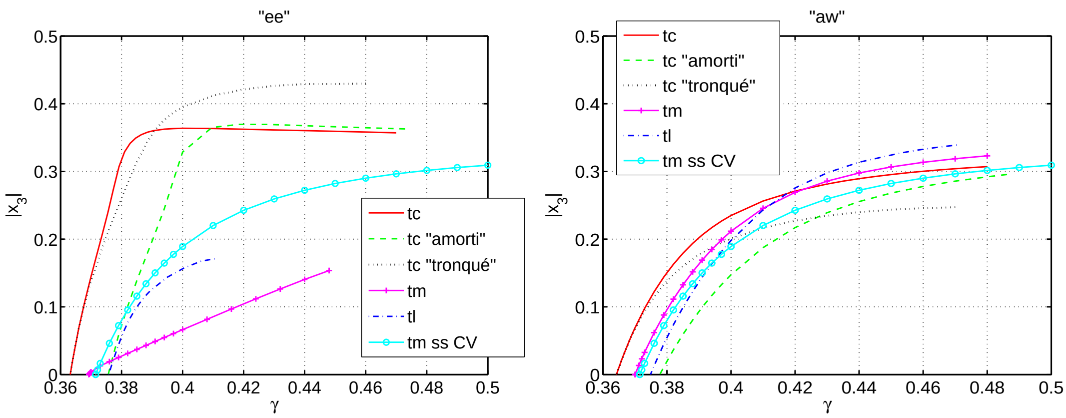


FIG. 3.13 – Module de x_3 en fonction de la pression dans la bouche pour les différents tuyaux : configuration "ee" à gauche et "aw" à droite.

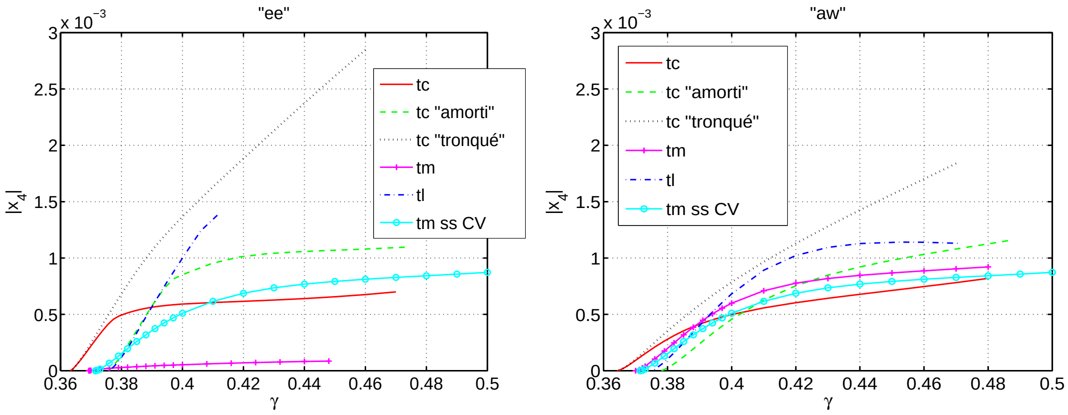


FIG. 3.14 – Module de x_4 en fonction de la pression dans la bouche pour les différents tuyaux : configuration "ee" à gauche et "aw" à droite.

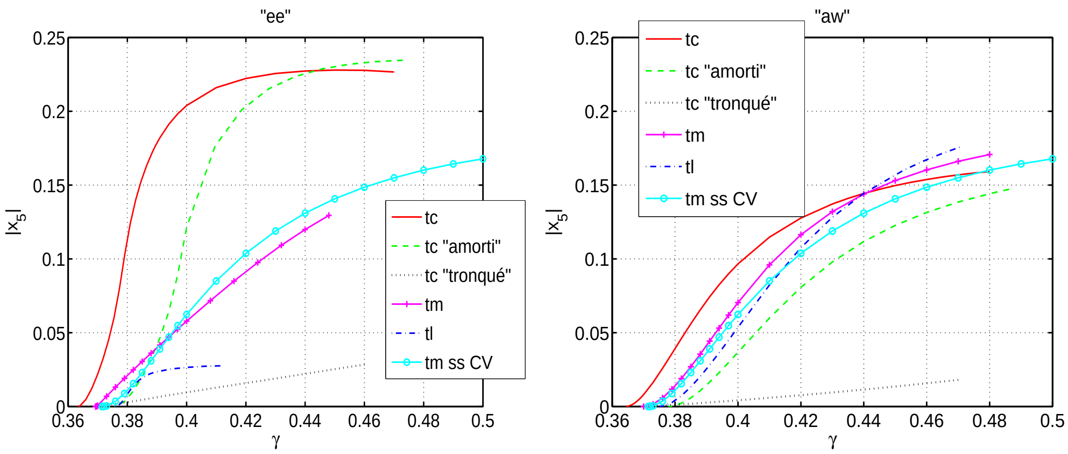


FIG. 3.15 – Module de x_5 en fonction de la pression dans la bouche pour les différents tuyaux : configuration "ee" à gauche et "aw" à droite.

Ces figures montrent une différence frappante entre les deux configurations "ee" et "aw". Alors que, pour cette dernière, les courbes sont dans l'ensemble très similaires pour les différents tuyaux et ne diffèrent que peu du cas sans CV, elles ont en revanche pour le "ee" des allures très différentes et peuvent s'écarter notablement du cas sans CV.

Au vu de ces figures, il apparaît donc impossible de prédire a priori des effets, par la seule connaissance des courbes d'impédance, lorsque l'impédance du CV devient importante, puisque l'on ne retrouve pas ce à quoi on s'attendait pour le "ee". Ainsi, par exemple, le cinquième harmonique du tuyau long n'est non pas renforcé mais fortement diminué !

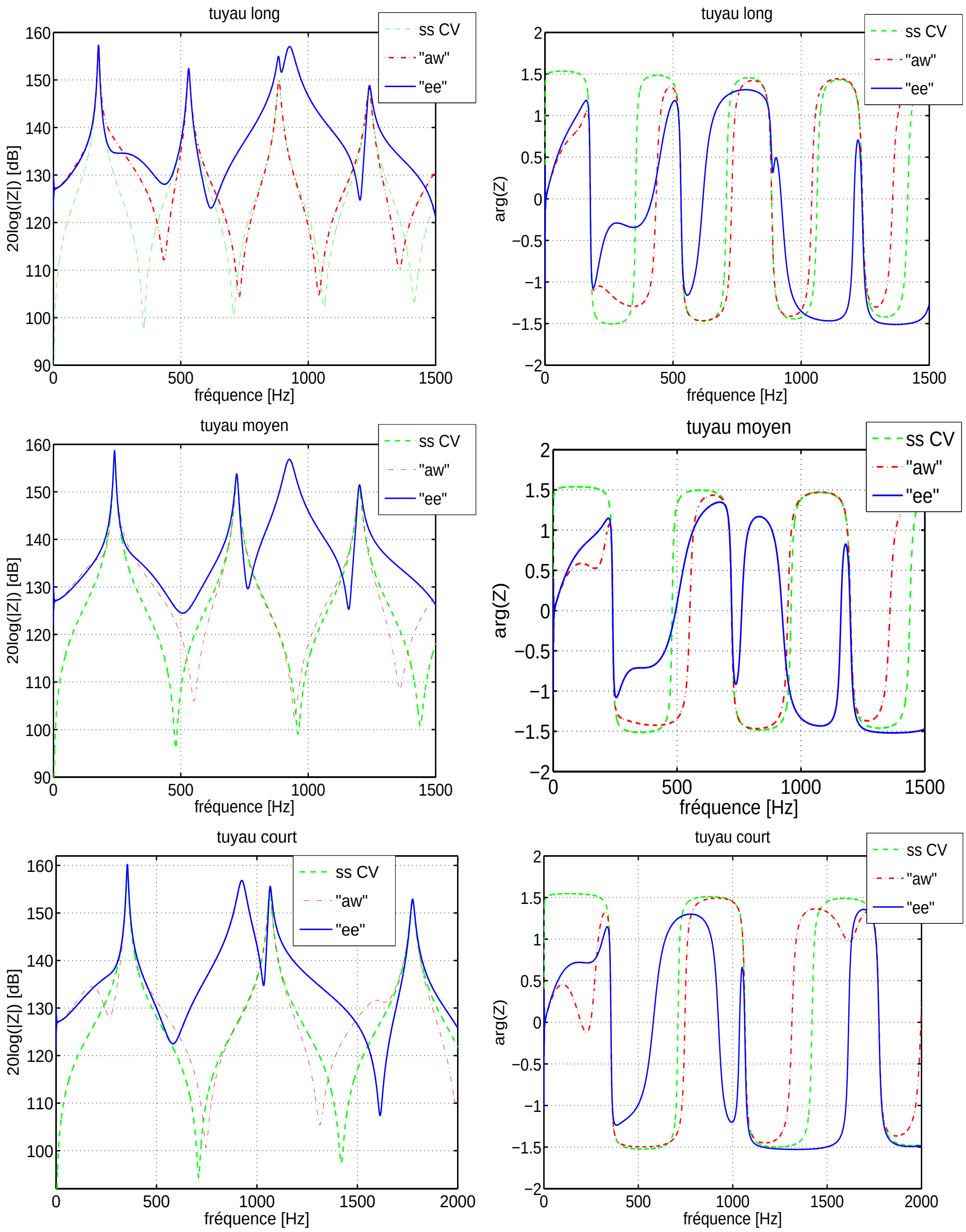


Fig. 3.16 – Module (à gauche) et argument (à droite) de l'impédance des différents tuyaux avec différentes configurations : sans CV, avec"ee" et avec "aw".

Ceci ne s'avère en fait pas très surprenant lorsque l'on examine le module et l'argument des impédances totales du système tuyau-CV (figure 3.16) : les courbes peuvent être en effet extrêmement chahutées et il est dès lors impossible de raisonner à partir des connaissances que l'on possède sur la clarinette.

Le "aw" n'affecte qu'assez peu l'impédance de la clarinette : les pics sont très peu modifiés

et la phase conserve son allure habituelle. Il en résulte cependant une inharmonicité des creux d'impédance, qui de ce fait, à la manière de la dispersion C.1.5, va affecter légèrement la fréquence, ainsi que le spectre. Sans nécessairement pouvoir prédire quantitativement les effets, nous saurons que les effets seront légers (peu de déviation entre les spectres des tuyaux avec ou sans CV).

Il n'en est en revanche pas de même pour le "ee", qui engendre une courbe d'impédance totale tellement chahutée, tant en module qu'en phase, qu'il est en fait impensable de vouloir expliquer quoi que ce soit à partir des connaissances du modèle de clarinette traditionnel (sans CV). Ainsi, sans même considérer des harmoniques de rang élevé ni s'éloigner du seuil, mais juste en regardant l'harmonique 2 très près du seuil, nous pouvons constater qu'il est quatre fois plus grand pour le tuyau long avec le CV "ee" que sans CV. Il n'est dès lors plus étonnant d'observer des comportements étranges pour la fréquence de jeu lorsqu'on s'éloigne du seuil.

Ceci se comprend également lorsque l'on étudie la phase des harmoniques qui, dans certains cas, s'éloignent énormément du cas sans conduit vocal[4].

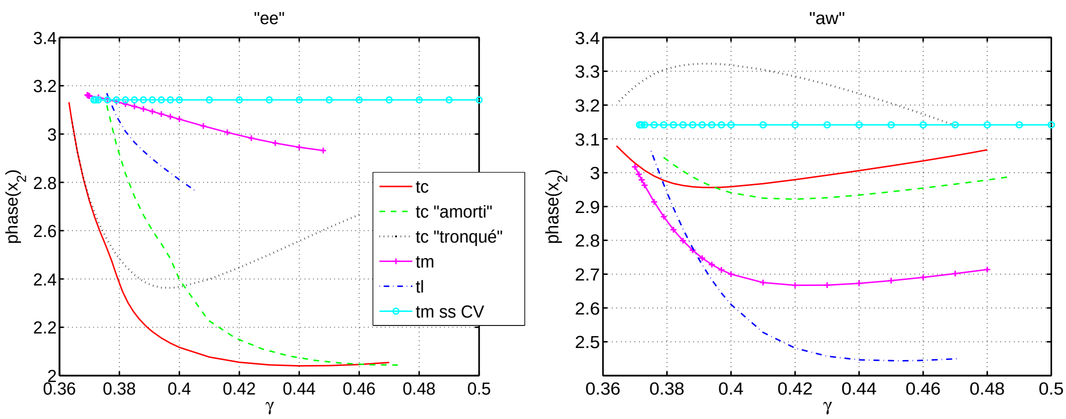


FIG. 3.17 – Phase (en radians) de x_2 en fonction de la pression dans la bouche pour les différents tuyaux : configuration "ee" à gauche et "aw" à droite (même échelle et même légende).

Les résultats de cette étude sont donc limités puisqu'il nous est impossible de les expliquer en raison du grand nombre de paramètres. On aurait pu penser qu'un raisonnement qualitatif, à partir des connaissances du modèle sans CV, sur ΔP aurait té plus approprié puisque c'est ΔP qui est l'équivalent de P_c dans le cas sans CV. Cependant, ce raisonnement ne peut se faire en raison de la modification importante de la phase de l'impédance totale, comme nous venons de le voir. De plus, il n'est vraiment pas simple ensuite de revenir à une prédiction qualitative de P_c à partir de ΔP. Ceci explique notre choix d'avoir présenté uniquement les résultats sur P_c : ce choix ne conduit pas à plus d'interprétations mais permet au moins d'avoir une prédiction numérique de la grandeur qui nous intéresse le plus au final.

Ces résultats permettent en tout cas de mettre en lumière toute la complexité des phénomènes mis en jeu. Nous pouvons ainsi comprendre que c'est grâce à des années de pratique (et non d'études théoriques !) que le musicien pourra connaître de manière ad hoc les effets que chaque configuration peut engendrer.

[4]Il est à noter que la dispersion n'a pas été prise en compte ici. Elle affecte cependant largement la phase des harmoniques de pression.

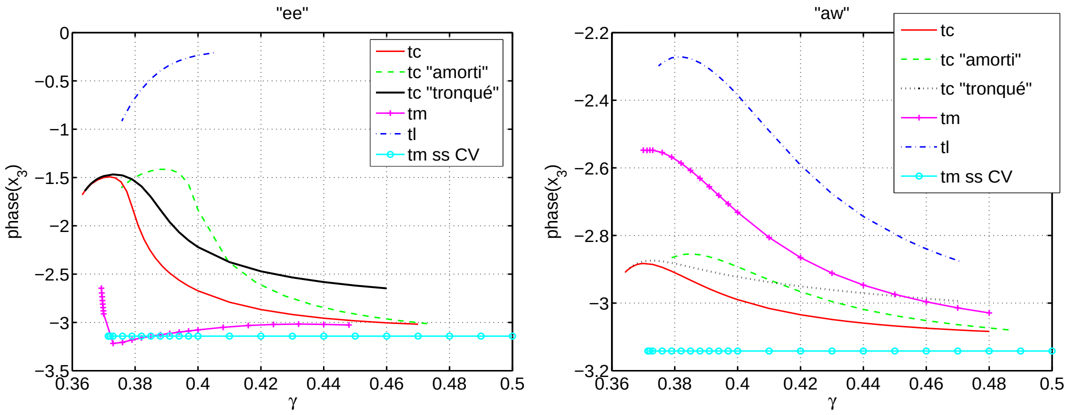


FIG. 3.18 – Phase (en radians) de x_3 en fonction de la pression dans la bouche pour les différents tuyaux : configuration "ee" à gauche et "aw" à droite.

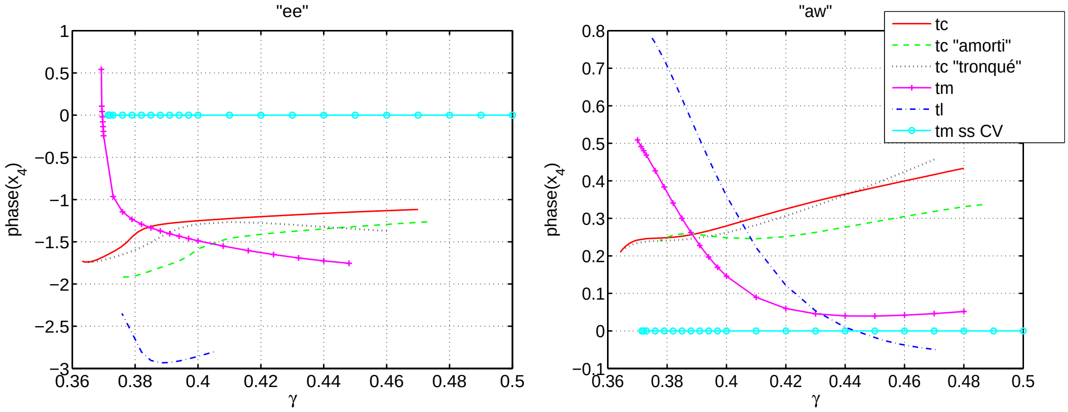


FIG. 3.19 – Phase (en radians) de x_4 en fonction de la pression dans la bouche pour les différents tuyaux : configuration "ee" à gauche et "aw" à droite.

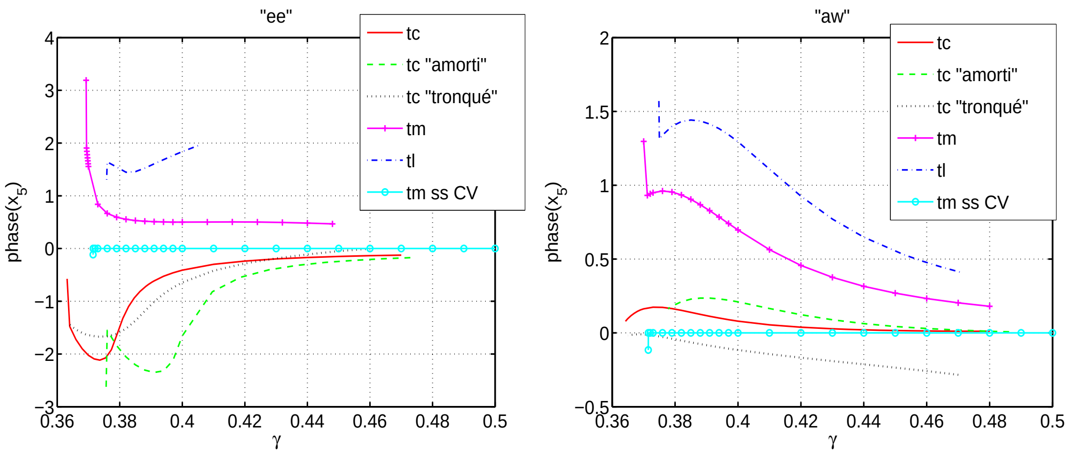


FIG. 3.20 – Phase (en radians) de x_5 en fonction de la pression dans la bouche pour les différents tuyaux : configuration "ee" à gauche et "aw" à droite.

3.6.2 Influence de la dispersion et d'un modèle plus complet de l'anche

Il est intéressant de comparer, voire de coupler, l'effet du CV à d'autres effets, mieux connus, comme celui de la dispersion ou bien de la masse et de l'amortissement de l'anche afin de déterminer quels sont les effets les plus importants.

Pour cette comparaison, nous nous appuyons sur les résultats de l'annexe C, avec cependant une différence de notation pour rester cohérent avec les autres chapitres : f_c est la première fréquence de résonance du tuyau contre f_0 dans l'annexe, et f_o la fréquence de jeu au seuil contre f_p dans l'annexe.

L'effet de la dispersion s'effectue toujours dans le même sens : la fréquence de jeu augmente avec γ. D'après C.1.5, la fréquence varie à peu près de $0.984 f_c$ à $0.992 f_c$ ce qui fait une différence de 14 cents entre le seuil d'oscillation et la fin du régime anche non battante. L'effet est donc du même ordre de grandeur que celui observé sur le tuyau court "tronqué" et le tuyau long en configuration "ee", de sorte que les deux effets peuvent s'ajouter ou au contraire se compenser.

Dans tous les cas, l'ordre de grandeur de ces effets est très supérieur à l'effet dû à la prise en compte de la masse et de l'amortissement de l'anche (cf partie C.1.6) pour les notes graves. En revanche, la résonance d'anche a une influence importante pour les notes aiguës de la clarinette, en particulier sur le domaine seuil d'oscillation-seuil de battement de sorte que nous en tiendrons compte à la partie 3.6.3.

3.6.3 Simulation d'une clarinette réelle

Pour les simulations numériques, nous utiliserons les mesures d'impédance que nous avons faites au Mans (grâce à leur dispositif décrit dans [19, 18]). Afin de pouvoir comparer théorie et expérience, elles ont été réalisées pour les deux configurations du conduit vocal artificiel "ee" et "aw" ainsi que pour la clarinette avec laquelle nous ferons les expériences du chapitre 4. Lors de la mesure de l'impédance de la clarinette, le bec était remplacé par un cylindre de volume quivalent (dans notre cas un cylindre de diamètre 15 mm et de longueur 63.2 mm, soit de volume 11.2 mL).

Le débit d'anche est simulé par une correction de longueur moyenne de 7 mm d'après les travaux de Dalmont et coll. [20].

Les simulations ont été réalisées du seuil d'oscillation au seuil de battement de l'anche (repéré par *Harmbal* par le fait que le débit u s'annule sur une partie de la période).

Les notes choisies sont les suivantes :
- G3, C4 et G4, qui pourront être respectivement comparées aux tuyaux long, moyen et court
- des notes de l'aigu (A5, B5 et C6), pour lesquelles l'embouchure est cruciale. Ainsi, un débutant arrive rarement à jouter au-dessus du A5 et nous verrons au chapitre 4 que ce sont également ces notes qui ont posé problème avec la bouche artificielle et que leur

émission semble être contrôlée de manière importante par le CV.

Le modèle complet de l'anche a été pris en compte pour les notes aigues à partir du A5 (l'influence de la résonance d'anche étant complètement négligeable pour les notes graves) et les valeurs des paramètres M et R sont données dans le tableau 3.1. Elles ont été calculées en conservant les valeurs usuelles de la littérature $g_r = 2900\text{s}^{-1}$ et $\mu_r = 0.0231\text{kg.m}^2$, et en calculant $\omega_r = \sqrt{\frac{k_r}{\mu_r}}$ à partir de la détermination de $k_r = \frac{P_M}{H}$ grâce aux valeurs expérimentales du paragraphe 4.3, ce qui donne $\omega_r = 21921\text{rad.s}^{-1}$.

Note	M	R
A5	0.054	0.031
B5	0.068	0.035
C6	0.074	0.036

TAB. 3.1 – Valeur des paramètres sans dimensions M et R de l'anche.

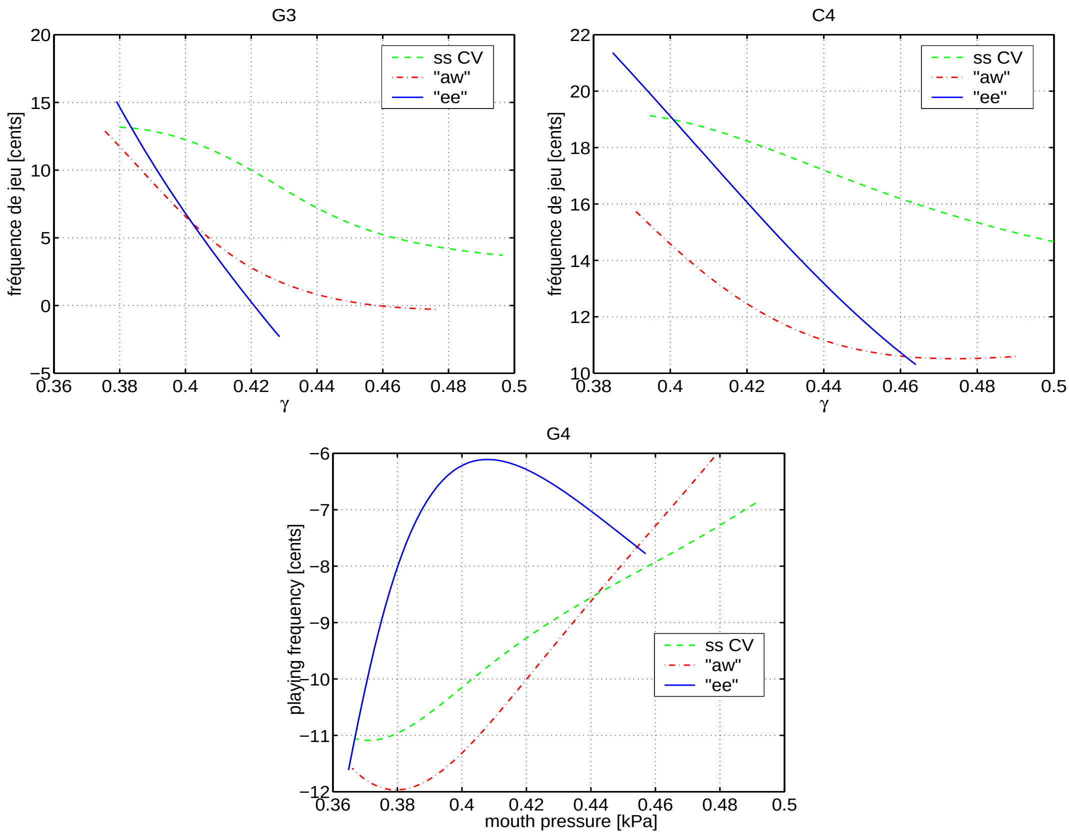


FIG. 3.21 – Fréquence de jeu en fonction de γ, calculée par *Harmbal* pour les notes G3, C4, G4 dans trois cas : sans CV et les deux configurations "ee" et "aw".

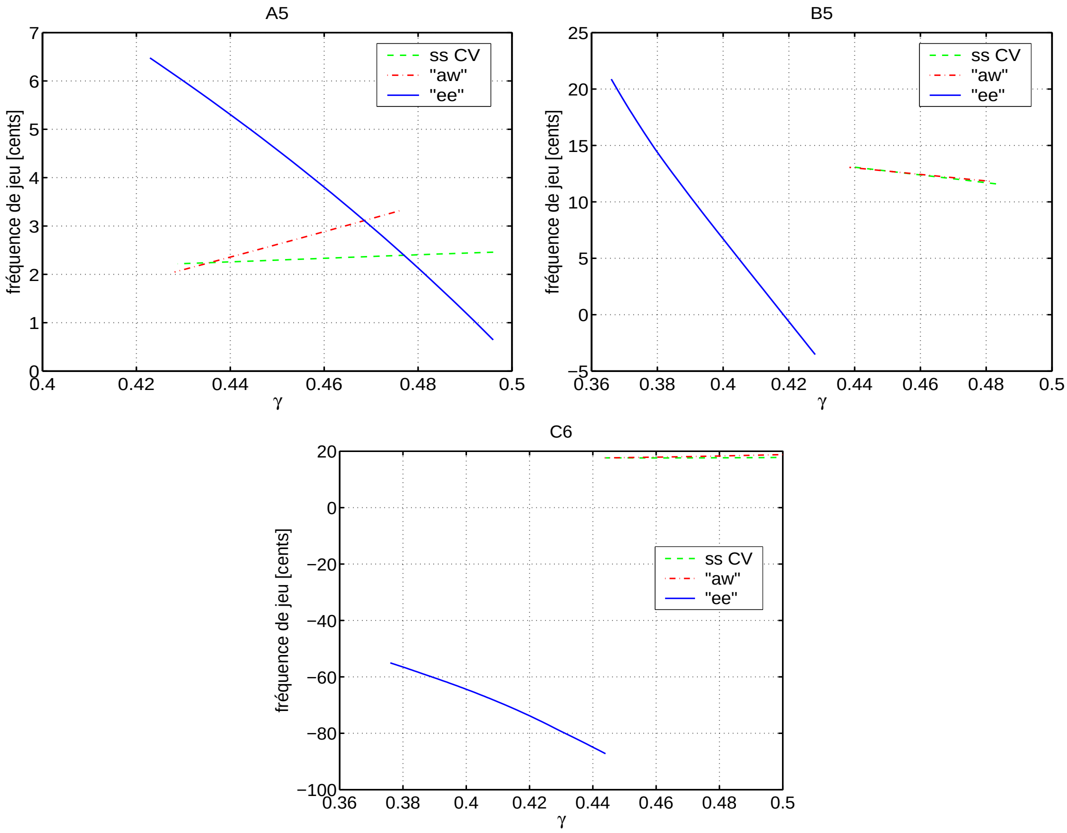


FIG. 3.22 – Fréquence de jeu en fonction de γ, calculée par *Harmbal* pour les notes A5, B5 et C6 dans trois cas : sans CV et les deux configurations ”ee” et ”aw”.

Le seuil d’oscillation

Considérons tout d’abord les seuils et comparons pour cela les figures 3.21 et 3.22 à la figure 3.9. Les seuils sont légèrement plus élevés pour la clarinette que pour les tuyaux car les pertes sont plus importantes dans la clarinette, qui a de ce fait des pics moins aigus et d’amplitude plus faible qu’un tuyau cylindrique de même longueur et de même diamètre. Or la pression de seuil varie en sens contraire de l’amplitude du premier pic d’impédance, d’où le résultat. Cependant, la diminution de la pression de seuil avec la longueur de tuyau est bien respectée : γ au seuil vaut environ 0.367 pour le G4, alors qu’elle vaut environ 0.379 pour le G3, de la même manière qu’on avait obtenu un seuil de 0.364 pour le tuyau court contre 0.376 pour le tuyau long.

Il est à noter que, pour ces trois notes, l’effet d’un changement de configuration du CV sur la pression de seuil peut être assez important et de sens différent. Ainsi, la configuration “ee” abaisse notablement la valeur de γ au seuil pour la note C4 (et très légerement pour la note G4) alors que c’est la configuration “aw” qui l’abaisse sensiblement pour la note G3.

Les notes A5, B5 et C6 étant jouées sur des modes supérieurs, les pics d’impédance correspondants sont affaiblis et les seuils plus élevés que pour les notes du registre fondamental, soit G3, C4 et G4, du moins pour la configuration “aw”. Un phénomène intéressant apparaît

en effet avec le CV “ee” : les pressions de seuil sont diminuées de manière très importante pour les notes B5 et C6. Ceci est en fait à corréler avec la résonance du CV “ee” dans cette gamme de fréquences. Ainsi, la figure 3.23 donnant les impédances totales pour les trois notes

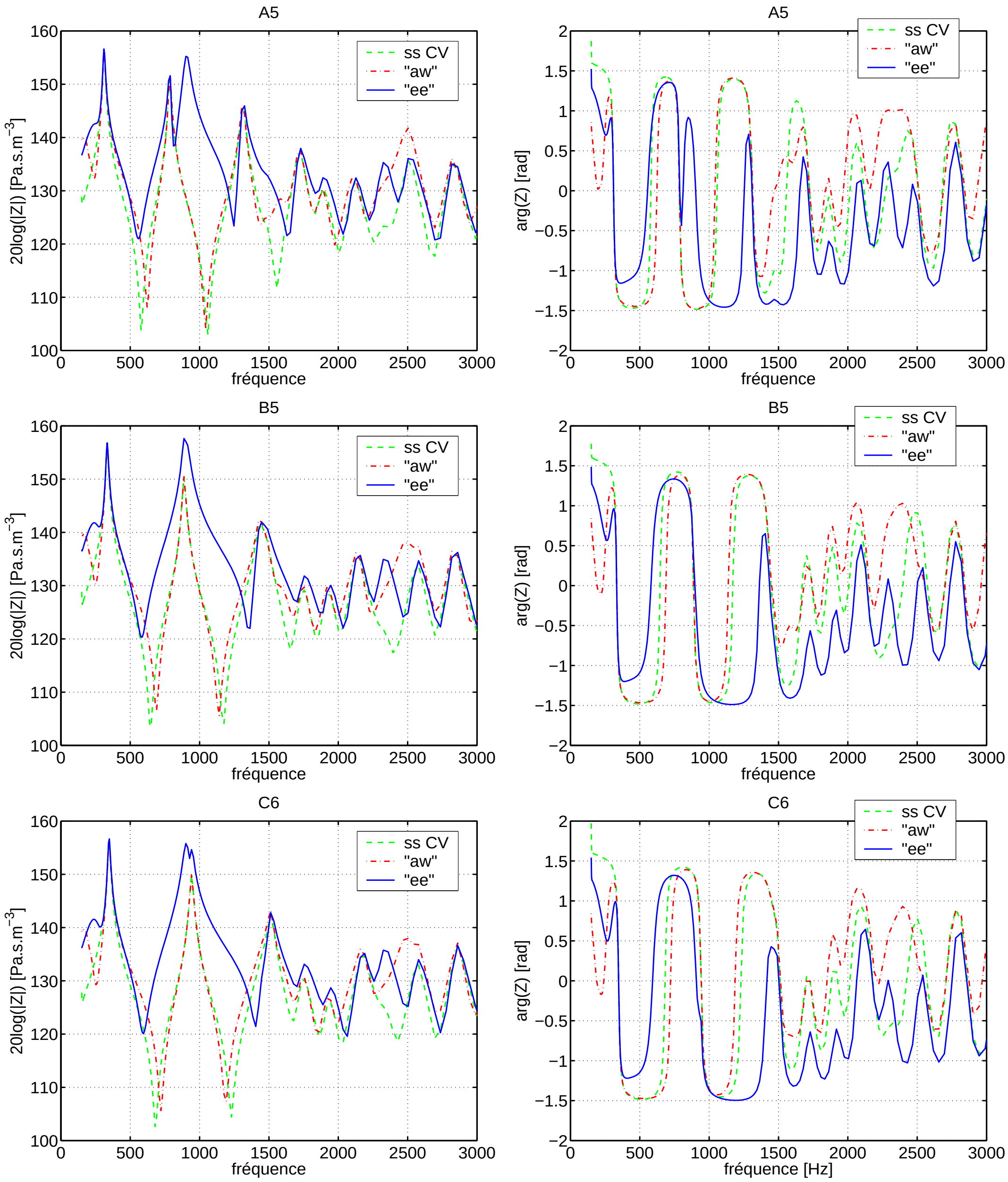


Fig. 3.23 – Impédance (module à gauche et argument à droite) du système total pour les trois notes A5, B5 et C6 dans plusieurs configurations de CV (sans, ”ee” et ”aw”). Attention : le pic d’impédance sur lequel aura lieu l’oscillation n’est pas le premier, comme dans le registre grave, mais le deuxième (l’amplitude du premier pic étant réduite par l’ouverture de la clé de registre).

A5, B5 et C6, permet d’avancer quelques explications. Pour les deux notes B5 et C6, le pic est nettement renforcé ce qui engendre une pression de seuil plus basse, et de plus la fréquence

du pic est déplacée vers les hautes fréquences pour le B5 et vers les basses fréquences pour le C6. Ce déplacement engendre un déplacement dans le même sens de la fréquence de jeu, ce qui est conforme à la différence de fréquence de jeu au seuil que l'on peut observer à la figure 3.22 entre les configurations “aw” et “ee”, pour les deux notes B5 et C6.

Il faut cependant noter que *Harmbal* ne peut calculer que des solutions périodiques et ne peut donc trouver les solutions quasi-harmoniques qui résultent de l'apparition d'un multiphonique (que nous observerons expérimentalement au chapitre 4) en raison d'une forte inharmonicité de deux pics d'impédance, d'amplitudes voisines.

La fréquence de jeu

Le seuil de perceptibilité étant d'environ 4 cents, nous pouvons tout d'abord remarquer que la différence entre les fréquences de jeu pour les configurations “ee” et “aw” n'est pas perceptible sur l'ensemble du registre. Elle l'est seulement pour les notes à tuyau court et les notes aiguës, conformément à ce que disent les clarinettistes.
D'autre part, excepté pour la note C6, que nous avons déjà discutée, la fréquence de jeu est quasiment toujours plus haute pour le “ee” que pour le “aw”. Ceci prouve que le changement de pince du musicien lorsqu'il passe du “aw” au “ee” n'est donc pas seul responsable de la hausse de fréquence.

Par ailleurs, la configuration “aw” pourrait être considérée a priori comme une configuration “neutre” puisque son impédance est très inférieure à celle de la clarinette, c'est-à-dire qu'on aurait pu imaginer qu'il n'y aurait pas de différence entre cette configuration et le cas sans CV. Mais cela aurait été oublier le caractère spécial de la clarinette, qui ne possède pas d'harmoniques pairs (contrairement au saxophone). Par conséquent, le CV a une importance énorme au niveau des ces harmoniques pairs, puisque dans les creux d'impédance de la clarinette, l'impédance du CV n'est plus du tout négligeable. Or nous avons vu précédemment que la partie imaginaire de l'impédance au niveau du deuxième harmonique influe grandement sur la fréquence de sorte qu'il serait normal d'observer une différence de fréquence de jeu entre le “aw” et la cas sans CV.

La figure 3.24 montre un déplacement du premier creux d'impédance par la configuration “aw” (ceci se voit aussi bien sur l'amplitude que sur la phase) beaucoup plus important pour les notes G3 et C4 que pour la note G4, ce qui explique très bien les effets observés à la figure 3.21 : la fréquence de jeu pour la configuration “aw” est voisine de celle sans CV pour le G4 mais s'en éloigne plus pour les notes G3 et C4. Une évaluation quantitative de la différence de fréquence n'est en revanche pas possible autrement que par la résolution numérique des équations.

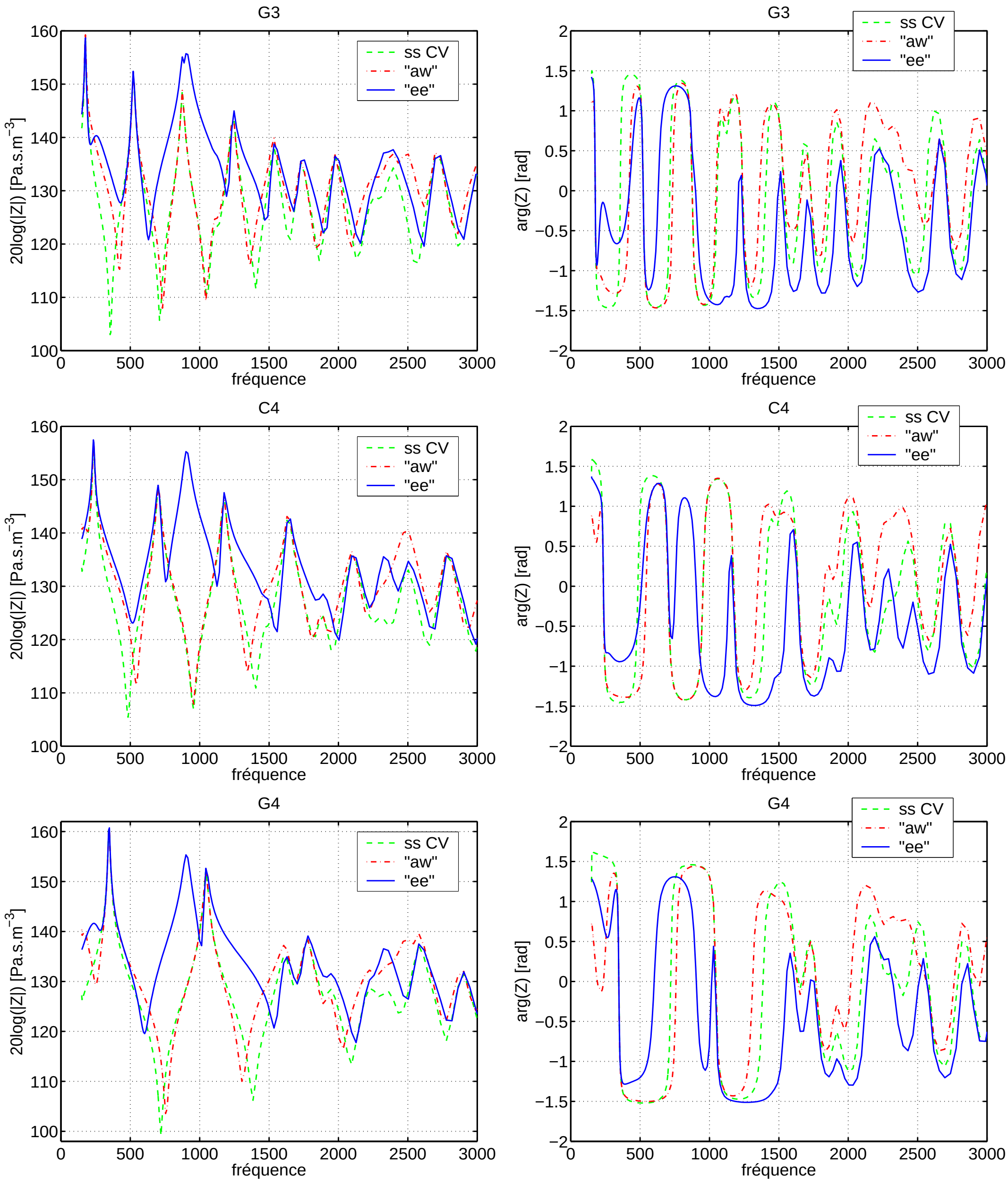


Fig. 3.24 – Impédance (module à gauche et argument à droite) du système total pour les trois notes G3, C4 et G4 dans plusieurs configurations de CV (sans, ”ee” et ”aw”).

Le spectre

En ce qui concerne le spectre, nous nous restreignons ici à l'étude de deux notes afin de ne pas encombrer davantage le texte avec une multitude de figures. Nous avons tout d'abord choisi une des notes qui correspondent à un tuyau cylindrique de l'étude 3.6.1, en l'occurrence le C4, afin de pouvoir comparer les résultats.

Les évolutions de la figure 3.25 sont très similaires à celles du tuyau moyen dans les fi-

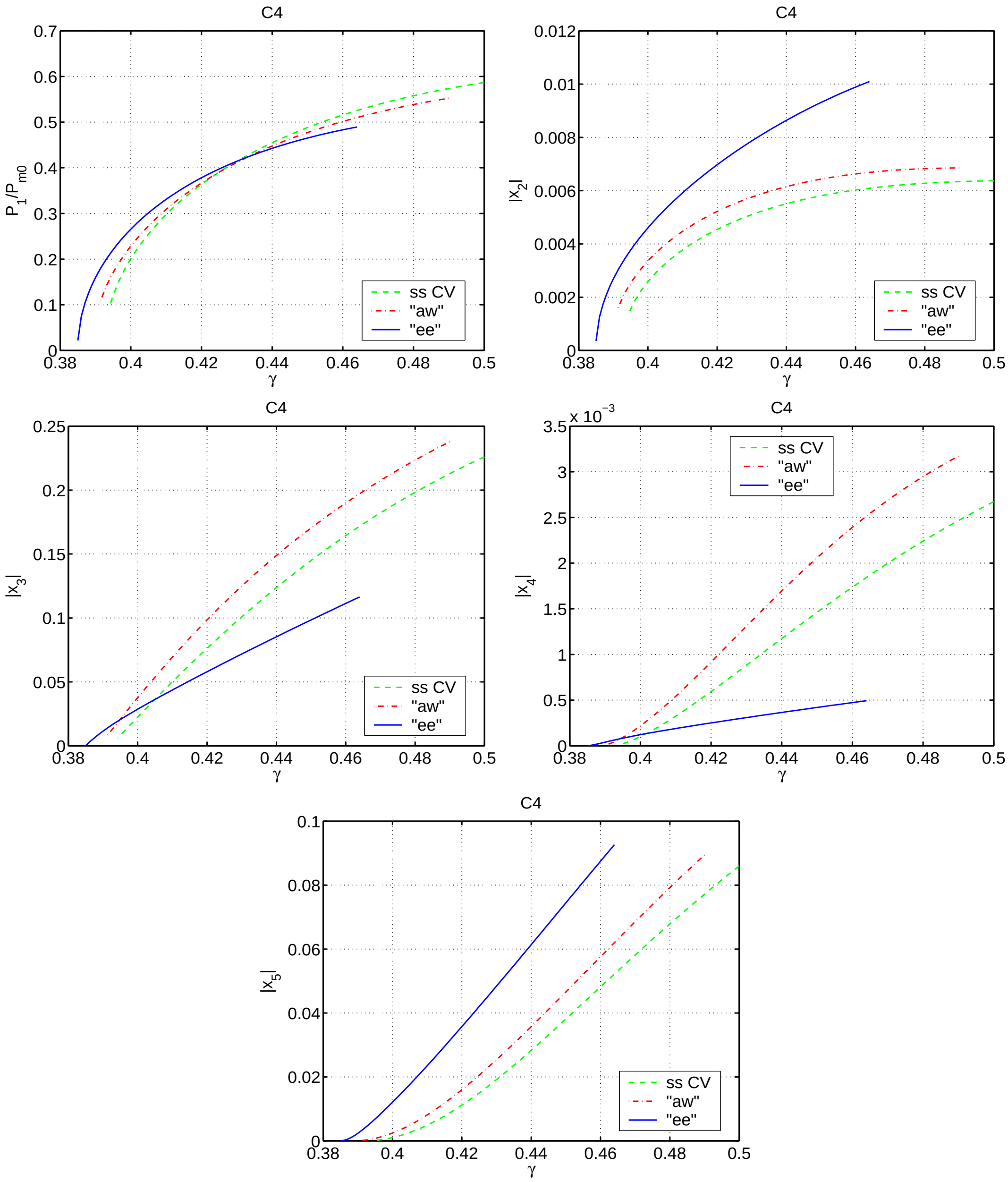


FIG. 3.25 – Module de P_1/P_{m0} ainsi que de $x_i = P_{ci}/P_{c1}$ (rapport de l'harmonique i, i variant de 2 à 5, sur l'harmonique 1 dans le barillet) en fonction de la pression dans la bouche pour la note C4, suivant trois configurations de CV : sans, "ee" et "aw".

gures 3.12 à 3.15, aussi bien qualitativement que quantitativement.

L'autre note choisie est le C6 car elle correspond à une situation un peu particulière puisque le pic d'impédance de la clarinette est accordé avec le pic de résonance du CV "ee". L'harmonique 5 n'est pas représenté à la figure 3.26 car il sort du domaine [0 4000 Hz].

Il est assez difficile de déterminer pourquoi les harmoniques supérieurs sont autant renforcés

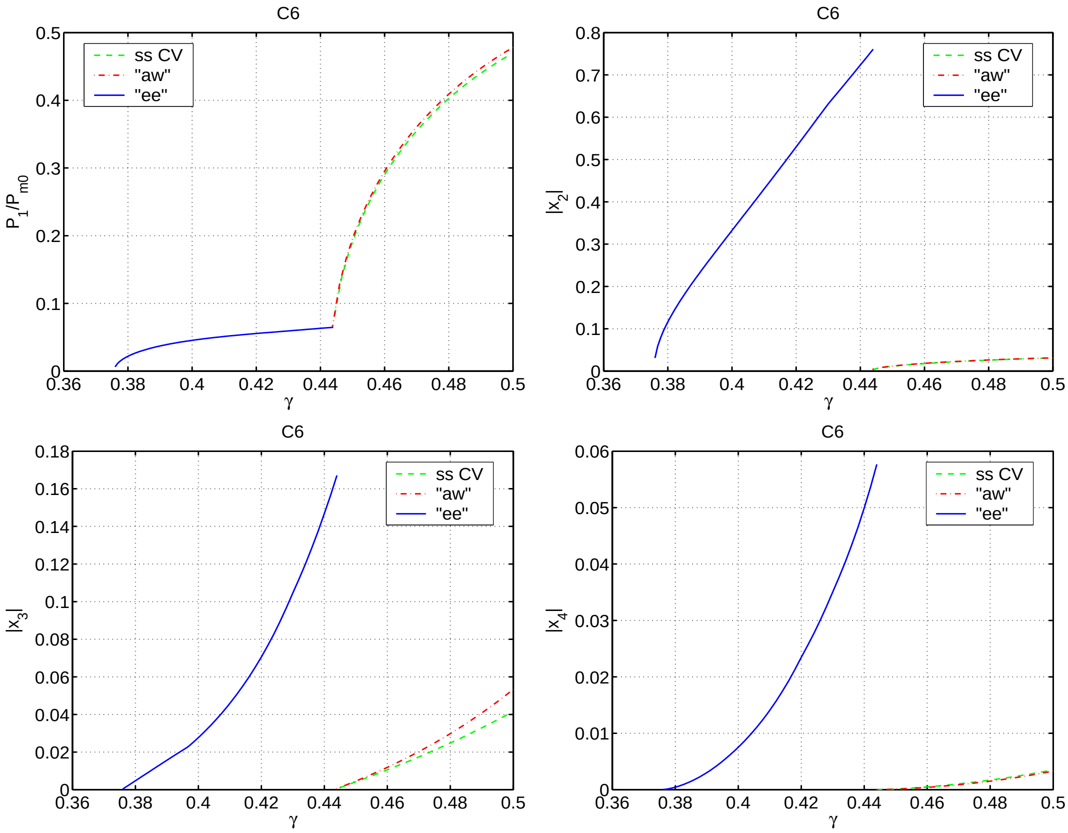


Fig. 3.26 – Module de P_1/P_{m0} ainsi que de $x_i = P_{ci}/P_{c1}$ (i de 2 à 4) en fonction de la pression dans la bouche pour la note C6, suivant trois configurations de CV : sans, "ee" et "aw".

avec la configuration "ee" alors que leur fréquence est au-dessus de la fréquence de coupure. Peut-être suffit-il que le troisième harmonique le soit ?

3.6.4 Influence de l'incertitude au niveau de la glotte

Nous avons déjà vu à la partie 2.6 comment l'ouverture glottique peut influer sur l'impédance du CV. Il nous faut donc étudier maintenant quels sont les effets engendrés sur la fréquence de jeu, les seuils et le spectre.

Les résultats sont présentés pour le tuyau long utilisé expérimentalement (soit de fréquence 201 Hz, supérieure à celle du tuyau long utilisé jusqu'à présent dans cette partie théorique, pour des raisons expliquées page 89) pour l'effet de la résistance (figure 3.27) et pour le tuyau court (également celui utilisé expérimentalement, soit de fréquence 431 Hz) pour l'effet de l'inertance (figure 3.28).

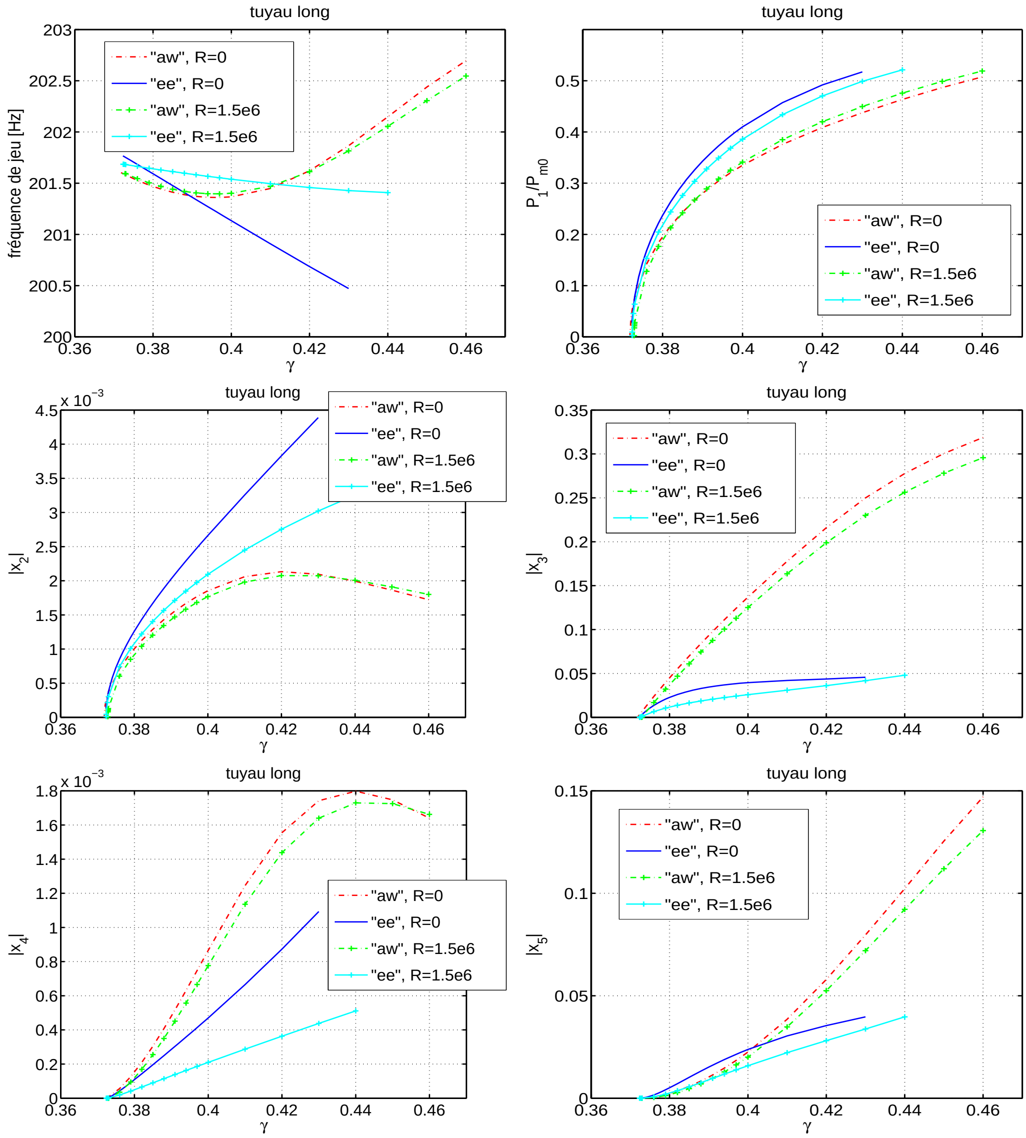


FIG. 3.27 – Fréquence de jeu et module de P_1/P_{m0} ainsi que de $x_i = P_{ci}/P_{c1}$ (i de 2 à 5) en fonction de la pression dans la bouche pour le tuyau long, lorsque la résitance glottique est soit nulle soit égale à 1.2 MPa.s.m^{-3}.

L'effet d'un changement de l'ouverture glottale qui s'accompagne d'une variation de la résistance ainsi que de l'inertance s'avère donc assez faible dans l'ensemble, en particulier pour la configuration "aw". Pour la configuration "ee", nous pouvons cependant observer quelques différences, en particulier au niveau de la fréquence de jeu et du seuil de battement, sans qu'elles affectent pour autant les interprétations.

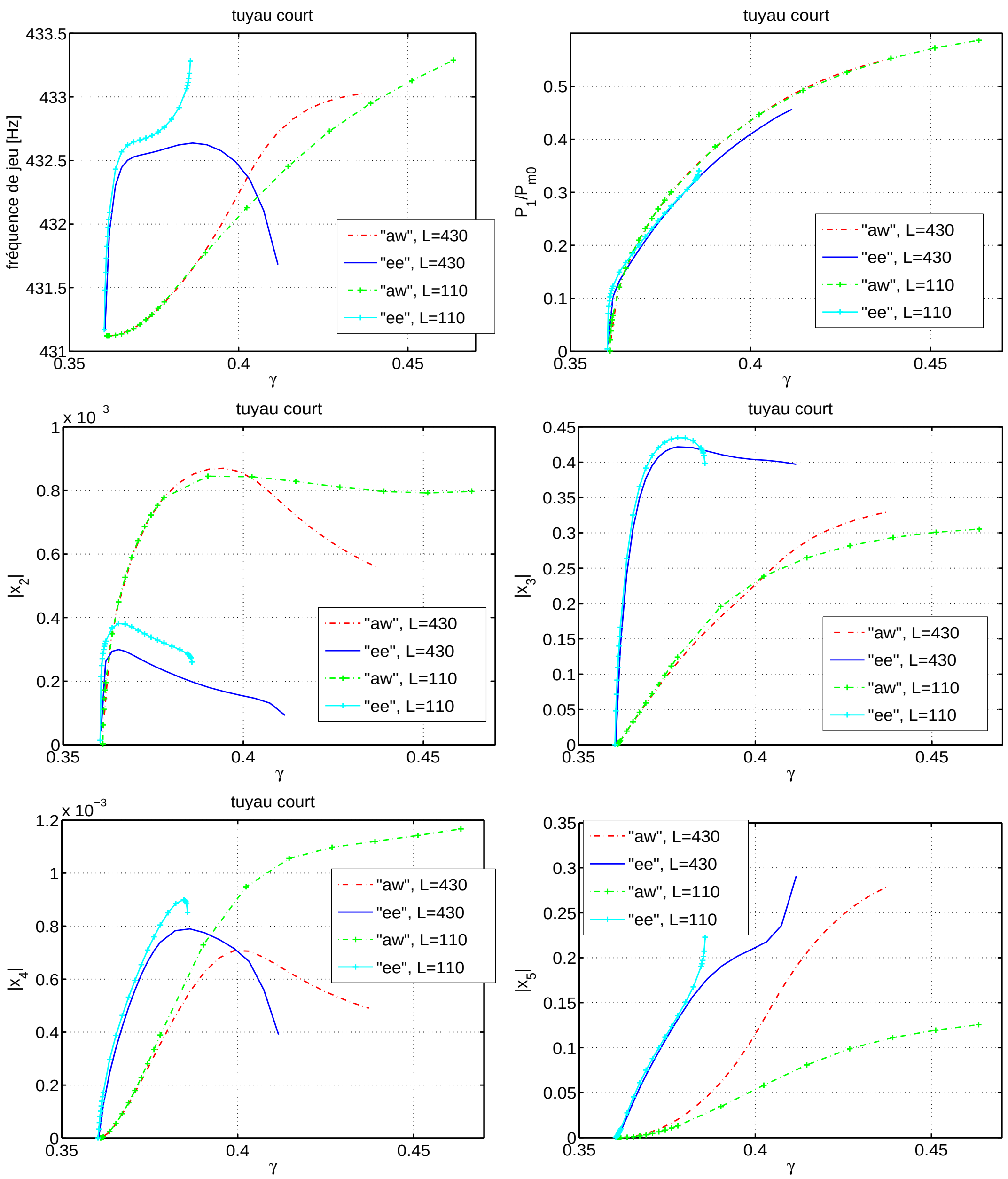


FIG. 3.28 – Fréquence de jeu et module de P_1/P_{m0} ainsi que de $x_i = P_{ci}/P_{c1}$ (i de 2 à 5) en fonction de la pression dans la bouche pour le tuyau long, lorsque l'inertance glottique vaut soit 430 soit 110 Pa.s^2.m^{-3}.

3.7 Conclusion

Cette étude théorique a donc permis de comprendre qualitativement certains effets induits par le conduit vocal sur la fréquence de jeu et le spectre, tout en donnant un ordre de grandeur quantitatif de ces effets grâce à la résolution numérique avec *Harmbal*.

Les développements analytiques aux premiers ordres près du seuil permettent de comprendre l'évolution de la fréquence de jeu lorsque la pression dans la bouche augmente mais uniquement dans un voisinage du seuil. En effet, dès que nous nous en éloignons, l'influence des harmoniques supérieurs n'est plus négligeable et perturbe le système de manière difficilement prédictible autrement que par une étude numérique.

L'étude numérique a permis de mettre en lumière la complexité du problème ce qui justifie ainsi l'utilisation du calcul numérique pour connaître les effets du CV, même s'il est parfois un peu frustrant de ne pouvoir tout expliquer par un raisonnement "avec les mains". En l'occurrence, un tel raisonnement (en particulier basé sur l'examen des courbes d'impédance comme il est souvent habituel de le faire pour la clarinette seule, en considérant la hauteur, l'acuité et l'harmonicité des pics) peut même conduire à des conclusions fausses.

L'étude numérique réalisée sur quelques doigtés de la clarinette a mis en évidence un certain nombre de phénomènes :
- l'effet sur la fréquence de jeu augmente lorsque la longueur de tuyau équivalente diminue (les maxima d'impédance du tuyau sont plus faibles mais les premiers harmoniques sont dans une bande de fréquence où l'impédance du CV est plus importante)
- dans la plupart des cas, la configuration "ee" conduit à une fréquence de jeu plus haute que la configuration "aw"
- la prise en compte du CV, même d'impédance faible, implique nécessairement un effet sur la fréquence de jeu en raison de sa grande influence sur les creux d'impédance de la clarinette au niveau des harmoniques pairs
- des effets particuliers comme un abaissement important de la pression de seuil ou bien une variation énorme de la fréquence de jeu peut être attendue si une résonance du CV coïncide avec le pic de résonance de la clarinette sur lequel a lieu l'oscillation.
- mises à part ces situations particulières, les deux configurations de CV "ee" et "aw" donnent des pressions de seuil à peu près identiques.

Il s'avère donc maintenant indispensable d'effectuer une étude expérimentale de l'influence du conduit vocal pour vérifier ces prédictions numériques et étendre les conclusions à toute la plage de jeu ainsi qu'à des phénomènes qu'il est impossible d'étudier avec *Harmbal* , comme par exemple la facilité de transition entre deux notes.

Chapitre 4

Etude expérimentale à l'aide d'une bouche artificielle

4.1 Introduction

Ce chapitre permet de présenter, suite à l'étude théorique précédente, une étude expérimentale du problème, principalement réalisée avec une bouche artificielle incluant un conduit vocal, mais également complétée par des mesures sur des musiciens. L'intérêt majeur de ce dispositif artificiel est le découplage des lèvres du conduit vocal, ce qui nous permet de nous affranchir de la modificiation de l'embouchure inhérente à la modification de la configuration du conduit vocal chez les musiciens, et donc d'étudier uniquement les effets dus à une variation de l'impédance de celui-ci.

Après une description du dispositif expérimental mis en place, nous verrons comment nous pouvons déterminer assez grossièrement les paramètres du modèle élémentaire, qui nous serviront dans la comparaison entre les résultats expérimentaux et les prédictions théoriques.

Avant d'étudier la clarinette, nous étudierons, comme au chapitre précédent, trois tuyaux cylindriques. Nous nous intéresserons en particulier à la fréquence de jeu, à la pression au seuil d'oscillation ainsi qu'aux spectres harmoniques dans le barillet et dans la bouche. Les résultats seront comparés aux résultats numériques de la partie 3.6.1.

Enfin, l'influence du conduit vocal sera étudiée sur la clarinette pour différents cas de figures. Tout d'abord, une étude similaire à celle des tuyaux cylindriques sera réalisée pour un échantillon représentatif de doigtés et certains résultats seront également comparés à l'étude théorique de la partie 3.6.3. Nous nous intéresserons ensuite à d'autres effets (impossibles à déterminer avec *Harmbal*) comme la facilité d'émission dans le suraigu, la qualité des transitions pour des intervalles délicats d'octave ou de sixte, ou encore la coloration du bruit juste avant le seuil d'oscillation qui a un grand intérêt pédagogique.

4.2 La bouche artificielle

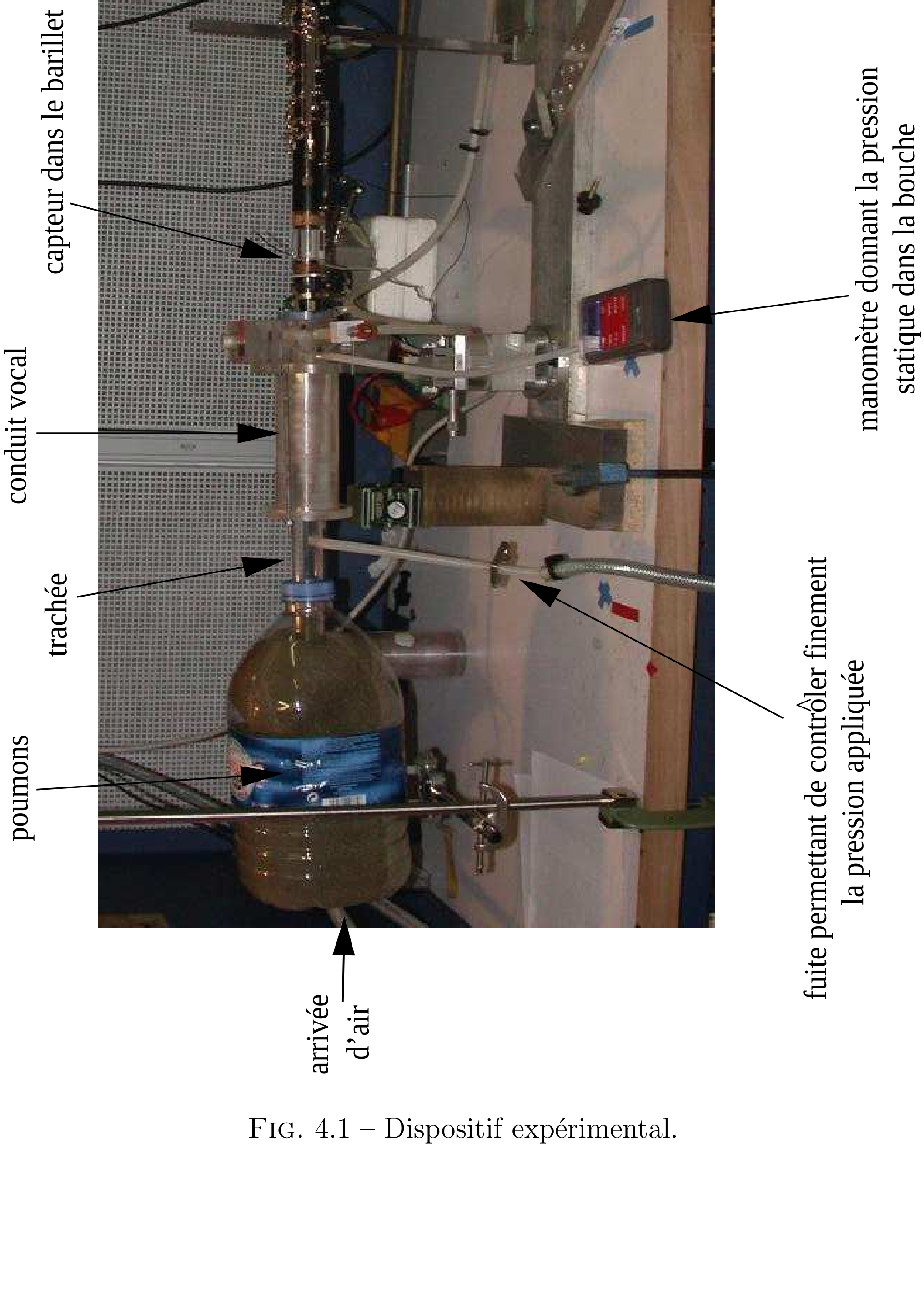


FIG. 4.1 – Dispositif expérimental.

4.2.1 Description générale

Le dispositif expérimental complet est représenté à la figure 4.1.

Ce dispositif a été mis au point à partir des bouches artificielles déjà existantes dans d'autres laboratoires, à partir de celle conçue par Christophe Vergez à l'Ircam pour l'étude de la trompette et à partir de mon expérience acquise en montant un prototype à Sydney, qui consistait en la première bouche avec conduit vocal artificiel pour un instrument à anche. Sans oublier l'extraordinaire ingéniosité du technicien qui l'a réalisée, Alain Terrier !

4.2.2 Les lèvres

Les lèvres sont des tubes de latex, remplis d'eau, dont la pression et par conséquent leur volume peuvent être modulés grâce à une colonne d'eau, de l'ordre de un mètre. En situation de jeu, le niveau de la colonne s'élève de 1mm lorsque la pression dans la bouche augmente de 8 kPa et aucune variation de géométrie des lèvres n'est détectable à l'oeil. Nous pouvons donc considérer que la force appliquée par la lèvre sur l'anche reste constante au cours du jeu.

D'autre part, ces lèvres peuvent être étirées (ce que l'on n'utilise pas pour la clarinette mais qui sera très important pour l'étude des cuivres) et un vilebrequin de 5 mm de diamètre monté sur un arbre pourvu d'une excentration de 2 mm permet en le tournant de raidir plus ou moins l'action de la lèvre sur l'anche, ce qui va en partie déterminer l'ouverture de l'anche au repos. Les "étireurs" et le raidisseur sont représentés sur la figure 4.2.

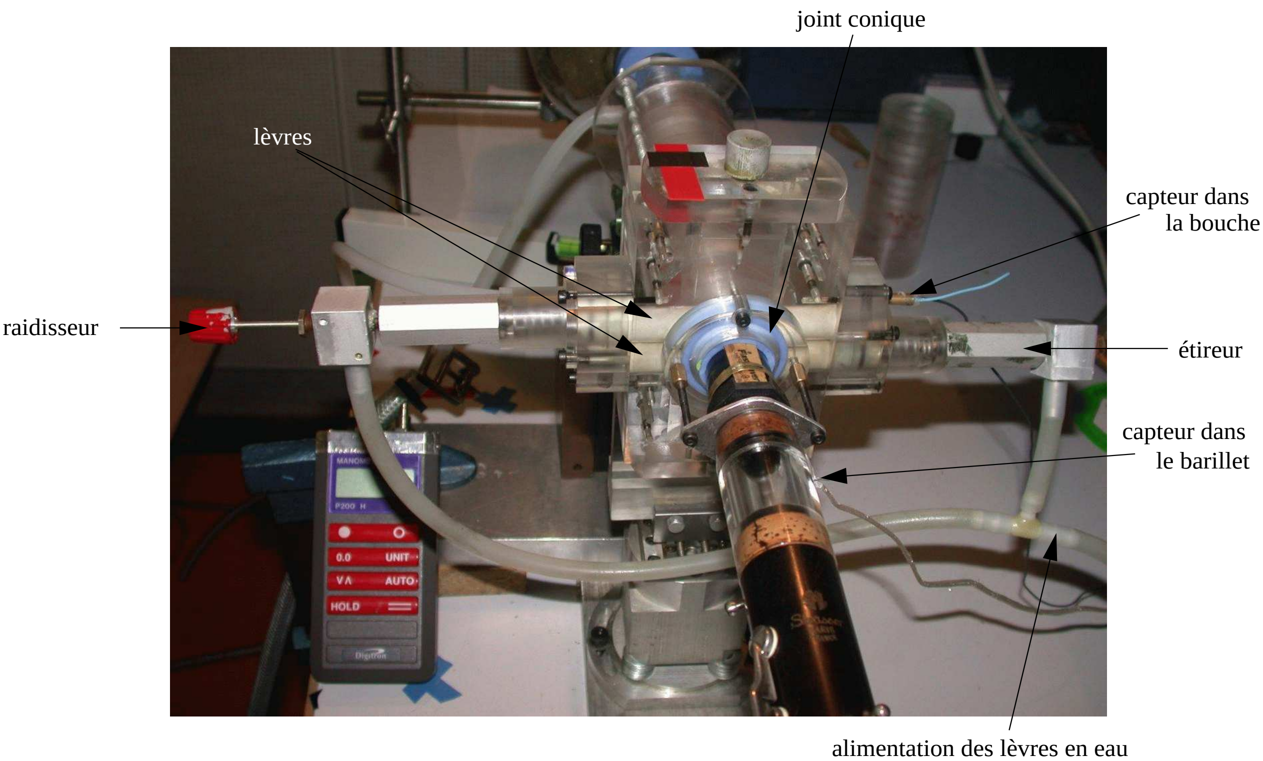


Fig. 4.2 – Zoom sur la partie centrale.

4.2.3 Le conduit respiratoire

Il est constitué d'un conduit vocal artificiel, d'une trachée et de poumons.

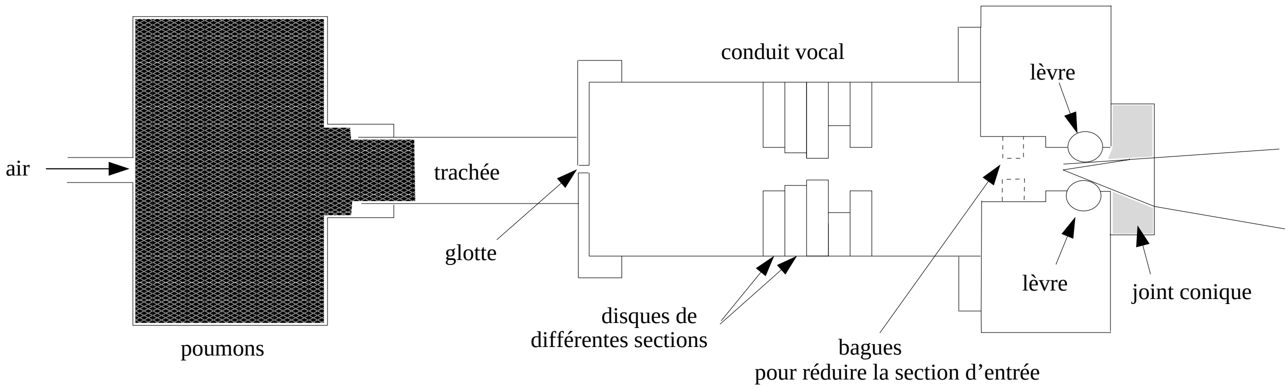


FIG. 4.3 – Schéma explicatif du conduit respiratoire artificiel.

Le conduit vocal est divisé en trois parties :
- la glotte, une fente rectangulaire d'épaisseur 3 mm, de largeur 1.5 mm et de longueur 1 cm (valeurs extraites des clichés de Mukai [71])
- un cylindre de longueur 15 cm que l'on peut remplir de disques de différents diamètres, d'épaisseur 5 mm ou 10 mm, afin de modéliser différentes configurations
- un cylindre de longueur 2 cm, directement inclus dans la pièce centrale du dispositif, dont le diamètre interne peut être ajusté par des bagues d'épaisseur 5 mm.

Ceci forme ainsi un conduit vocal d'une longueur de 17 cm, correspondant à la longueur moyenne d'un conduit vocal humain. Les diamètres des disques ont été choisis par rapport aux données IRM de Story et Titze [90].

Nous n'étudierons ici que les deux configurations "ee" et "aw" déterminées et décrites au paragraphe 2.5. Les sections des disques utilisés sont données dans le tableau 2.5 et leurs impédances sont représentées en échelle linéaire à la figure 2.27 et en échelle logarithmique à la figure 3.3 ou 2.27.

La trachée est un cylindre de longueur 14 cm et de diamètre 18 mm, et les poumons sont simulés par un bidon en plastique, d'un volume de 5L. L'ensemble est rempli de mousse très absorbante.

4.2.4 Contrôle de l'embouchure

L'embouchure est très sensible au positionnement de la clarinette et du conduit vocal. En effet, suivant leur inclinaison, la pression des lèvres sur l'anche va varier de manière très importante car l'ouverture de l'anche au repos sera très différente. C'est pour cette raison que la clarinette est posée sur un vernier afin de contrôler précisément sa position verticale. D'autre part, un niveau à laser, placé sur le haut de la bouche, permet de contrôler finement l'horizontalité du montage (en particulier lors du changement de configuration du conduit vocal) grâce à la projection du faisceau sur un repère éloigné.

4.2.5 Contrôle de la pression

La pression de l'air est d'abord contrôlée grossièrement par un détendeur puis plus finement par une petite fuite au niveau de la trachée. Cette fuite est indispensable lors du démarrage de l'oscillation car sinon, au moment où l'anche se met à vibrer, la surpression engendrée la fait plaquer de sorte que l'on saute directement du régime statique au régime anche plaquée, ce qui présente peu d'intérêt ! Son emplacement n'a pas d'importance : elle a été mise au niveau de la trachée par pure commodité. D'autre part, grâce à cette fuite, on peut, en pressant de manière ponctuelle avec le doigt sur le tuyau de fuite, créer un saut de pression brutal, à l'image de ce que peut obtenir un musicien avec la langue.

4.2.6 Réduction des fuites

L'une des difficultés majeures de ce dispositif a été la suppression des fuites au niveau du bec. En effet, dans les autres bouches artificielles déjà existantes, le volume buccal étant considéré comme sans influence, le bec était placé en entier dans une boîte ce qui permettait de faire le joint au niveau du barillet, c'est-à-dire sur une partie cylindrique. En revanche pour notre étude, le volume buccal doit avoir une taille réaliste, donc petite, de sorte que le joint doit se faire en aval des lèvres. La forme même de la pièce (la pièce centrale du dispositif) où sont encastrées les lèvres ainsi que la présence d'un joint conique, moulé autour du bec et pressé sur cette pièce centrale, permet d'éviter les fuites. Il faut faire cependant très attention que le joint ne presse pas trop sur l'anche, juste en aval des lèvres, car il s'est avéré que la condition imposée sur l'anche à cet endroit est primordiale dans la facilité de jeu[1].

4.2.7 Les capteurs

Il y en a trois :

- Un manomètre, placé à l'entrée de la bouche à 1.5 cm de l'anche, par commodité, afin de lire directement la pression statique appliquée.
- Un capteur de pression piézorésistif, situé en face du manomètre permettant de mesurer la pression statique et la pression dynamique dans la bouche. Il s'agit du modèle 8507C-2 (supportant une pression maximale de 15 kPa, de sensibilité 110.3 mV/psi) de la marque Endevco, gracieusement prêté par le LAUM.
- Un capteur de pression différentiel, à membrane en silicium, situé dans le barillet afin de mesurer le signal de pression dans la clarinette. Il s'agit du modèle EPE-541-0.35B-/M de la marque Entran (supportant une pression maximale de 15 kPa, de sensibilité 263.39 mV/FS). Ce capteur devait initialement être placé dans le bec, à 1.5 cm du bout de l'anche mais suite à différents problèmes "non scientifiques", il a malheureusement dû être placé dans le barillet. Ceci changera un peu la forme d'onde, surtout à assez haute fréquence. En revanche, la fréquence n'en sera pas affectée.

L'étalonnage des capteurs est décrit dans l'annexe F.

[1]Ceci remet d'ailleurs en cause, au moins partiellement, les modèles ne prenant en compte que la seule partie de l'anche à l'intérieur de la bouche, en amont des lèvres.

4.2.8 L'instrument d'étude

Le bec est un bec Vandoren B45, muni d'une anche plastifiée "Plasticover" de la marque Rico, de raideur 3. Ces anches ne sont pas adaptées pour la musique classique : elles sont très souples, produisent des sons tonitruants et ne permettent pas facilement de jouer l'aigu. Lorsque le clarinettiste Pierre-André Taillard est venu régler la bouche artificielle (en particulier la position de la lèvre sur l'anche et l'inclinaison de la clarinette), il a commencé par améliorer l'anche grâce au système Claripatch (annexe G.4) dont il est l'inventeur, et qui consiste en de fines languettes placées sous l'anche pour modifier la courbure de table et donc le comportement de l'anche. Dans notre cas, il a utilisé un patch standard N ainsi qu'un prototype Y qu'il a développé exprès pour l'anche Rico. La modification de la table engendrée par ces deux patchs est donnée dans l'annexe G.4. Ceci a permis d'obtenir au final une anche correcte tout en la gardant plastifiée. Le résultat fut immédiat : l'ambitus de la bouche artificielle est passé du E3-G5 au E3-E6, ce qui permet en particulier de tester la partie du registre dans laquelle le CV a certainement le plus d'influence.

Le barillet est un barillet en altuglas, réalisé par Alain Terrier, afin de pouvoir y placer aisément le capteur.

L'étude se fait soit sur une clarinette réelle, de la marque Strasser, soit sur des tuyaux cylindriques qui se fixent au niveau du barillet, de diamètre 1.7 cm et de longueurs respectives 10.8, 22.2 et 33.9 cm, afin de simuler les doigtés G4, C4 et G3 de la clarinette. Le diamètre de ces tubes a été choisi légèrement plus large que celui de la clarinette (1.5 cm) afin d'obtenir, en ce qui concerne l'amplitude des pics, une diminution (par rapport au tuyau cylindrique de diamètre 1.5 cm) similaire à celle due aux pertes importantes par rayonnement dans la clarinette. Ceci permet donc d'avoir, pour les tubes, des pics de résonance d'amplitude très voisine à celle des pics de la clarinette, et par conséquent la même importance relative du CV dans les deux cas.

4.3 Détermination des paramètres

Afin de pouvoir comparer les résultats expérimentaux avec les simulations, nous avons besoin des paramètres du modèle élémentaire, c'est-à-dire l'ouverture de l'anche au repos H et la pression de placage P_M ce qui nous permettra d'obtenir le coefficient de raideur de l'anche k et les grandeurs adimensionnées γ et ζ.

Une méthode élaborée au Mans qui consiste à remplacer le corps de la clarinette par un diaphragme [74], permet la détermination de la relation non linéaire $u = f(p)$ puis de la valeur des paramètres du modèle. Cette méthode n'étant cependant pas très simple à mettre en place et ne constituant pas un aspect prépondérant dans cette thèse, nous avons préféré mettre au point une méthode plus simple : à partir de clichés de l'anche pris pour différentes pressions dans la bouche, inférieures à la pression au seuil d'oscillation afin de rester en régime statique, nous pouvons mesurer l'ouverture de l'anche h ($h = H + y$ où H est l'ouverture au repos et y le déplacement de l'anche, défini au C.1.2) et en déduire la relation $h = f(\Delta P)$ où ΔP

est la différence de pression entre le bec et la bouche. Il s'avère que cette relation est linéaire ce qui nous permet d'en déduire le coefficient de raideur k ainsi que la pression de placage par extrapolation ($\Delta P - P_M = -kh$ avec $P_M = kH$). Il est à noter que pour la prise de ces clichés, le conduit vocal est remplacé par un bocal cylindrique avec une arrivée d'air latérale (cf figure F.2), ce qui permet de faire les clichés à travers la face arrière plane de ce bocal.

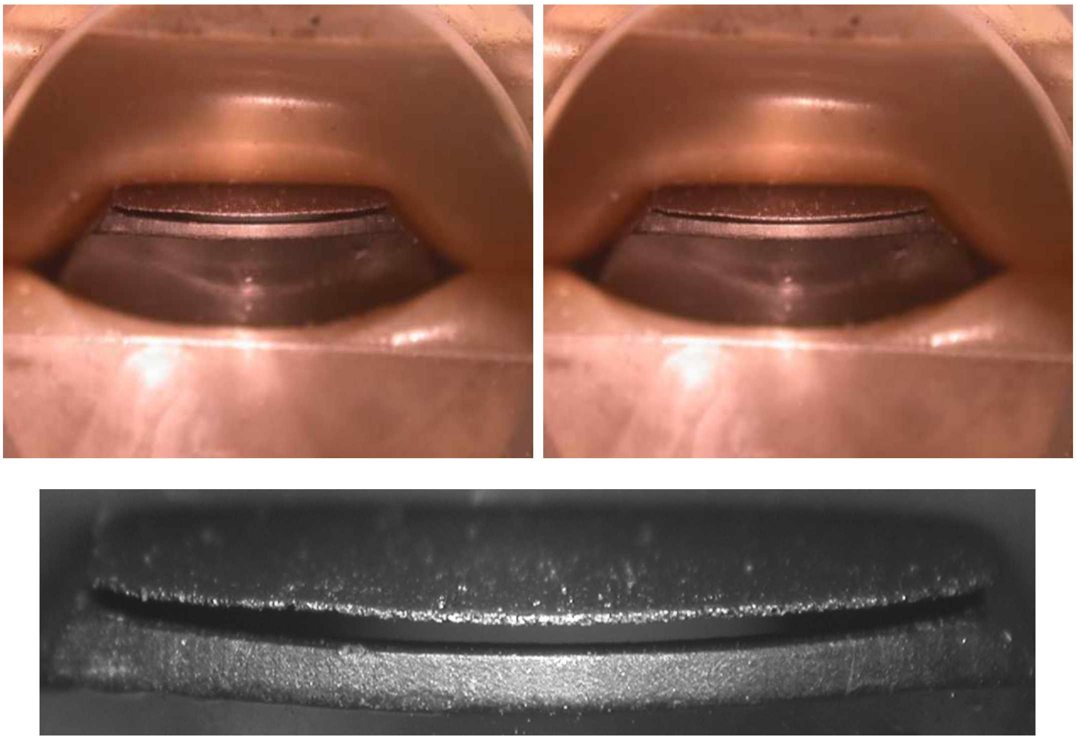


Fig. 4.4 – En haut : Clichés pris pour une pression acoustique dans la bouche nulle à gauche et de 1.5 kPa à droite. En bas : zoom du cliché de gauche tel qu'on peut le voir sous *Imagina*.

Le programme *Imagina* utilisé pour déterminer l'ouverture de l'anche à partir des photographies a été conçu par Matthias Coulon lors de son stage de fin d'études d'école d'ingénieur, à l'Ircam. Ce programme d'analyse d'images, écrit sous Matlab, permet, à partir de la donnée d'une référence physique, ici la largeur de l'anche, de 13.05 mm, de calculer la distance entre deux points donnés par l'utilisateur par une sélection à la souris. Comme la précision requise est assez importante, de l'ordre du micromètre puisque l'anche au repos n'est ouverte que d'environ 0.4 mm, le zoom optique des clichés puis le zoom numérique sous Matlab ne permettent pas d'obtenir cette précision pour deux raisons. La première est due au fait même de cliquer, qu'il est difficile de réaliser de manière immuable, exactement à l'endroit où l'on veut. La deuxième raison concerne directement la détermination de cet l'endroit où l'on veut cliquer : c'est notre oeil ici qui détermine les bordures de la fente, et ceci est d'autant plus précis que le contraste et la netteté sont bons. L'une des difficultés majeures lors de la prise des clichés réside donc dans l'éclairage du dispositif et la mise au point au centre de l'anche. Il faut que la bordure du bec soit suffisamment éclairée pour paraître scintillante mais sans l'être de trop afin d'éviter des reflets gênants. Il est indispensable de réaliser l'éclairage de face, c'est-à-dire directement sur l'anche, plutôt que par le bout de la clarinette ou du tuyau car dans ce cas, la largeur de

l'anche, telle qu'elle nous apparaît, est bien trop dépendante du contraste lumineux choisi par l'appareil. Cependant, même si la netteté et le contraste semblent très bons, il s'avère qu'en reproduisant la même mesure un certain nombre de fois, l'erreur est quand même de l'ordre de 5 voire 10 μm.

Enfin, un autre problème lié à l'anche elle-même est qu'il est assez rare qu'elle soit ouverte de manière parfaitement homogène ce qui pose le problème de savoir où l'on mesure son ouverture. D'autre part, elle présente des aspérités qui rendent la mesure encore plus délicate. Ces mesures nous permettent ainsi seulement d'avoir une estimation des paramètres utiles. L'erreur au final sur la pression de placage peut s'élever à 0.5 kPa mais peut être réduite en réalisant la mesure plusieurs fois et en moyennant.

Les résultats obtenus pour les trois embouchures, qui ont été utilisées dans les mesures qui suivent, sont présentés à la figure 4.5. En effet, pour chacune des situations - tuyaux cylindriques, clarinette dans le registre grave et médium et clarinette dans le registre aigu voire suraigu - l'embouchure a été optimisée à l'oreille pour avoir un "beau" son dans une plage de pression la plus grande possible. En ce qui concerne la clarinette, son angle d'inclinaison a été fixé à 11 degrés (inclinaison qui correspond grossièrement à celle que les clarinettistes peuvent adopter, sachant qu'ils bougent beaucoup !) et la différence entre les embouchures "clar-grave" et "clar-aigu" consiste en une légère baisse de la pression d'eau dans les lèvres. Notre colonne d'eau n'étant malheureusement pas graduée (c'est un des points à améliorer pour les prochaines mesures), il nous est difficile de la quantifier (quelques centimètres sur un mètre de colonne).

Par commodité, nous appellerons "cyl" l'embouchure utilisée pour les tuyaux et "clar-grave" ou "clar-aigu" celle pour la clarinette, respectivement dans le registre grave-médium et dans le registre aigu.

A partir de ces résultats, nous pouvons également déterminer le paramètre d'embouchure

$$\zeta = \frac{\rho c}{S} w H \sqrt{\frac{2}{\rho p_M}} \tag{4.1}$$

où les différentes grandeurs sont rappelées ci-dessous :
- ρ =1.29 kg.m^{-3}
- c =343 m.s^{-1} à la température ambiante de la salle d'expérimentation
- S est la section à la sortie du bec de clarinette, soit 177 mm^2 [2]
- w est la largeur de l'anche, soit 13.20 mm
- H est l'ouverture de l'anche au repos, données par les interpolations linéaires de la figure 4.5, soit $H = 0.49 \pm 0.02$ mm pour l'embouchure "cyl", $H = 0.39 \pm 0.02$ mm pour l'embouchure "clar-grave", et $H = 0.40 \pm 0.02$ mm pour l'embouchure "clar-aigu".
- $P_M = 5.55 \pm 0.1$ kPa dans le cas "cyl" , $P_M = 4.33 \pm 0.1$ kPa dans le cas "clar-grave " et $P_M = 3.85 \pm 0.1$ kPa dans le cas "clar-aigu" [3].

[2]Se pose quand-même la question de la pertinence de cette valeur, en particulier lorsque le tuyau placé dans le barillet est de diamètre un peu plus large, comme c'est le cas ici (1.7cm contre 1.5cm).

[3]La raideur effective de l'anche P_M/H semble donc dépendre fortement de la pression des lèvres. Il est d'ailleurs important de noter le comportement pour le moins surprenant pour les deux embouchures "clar" qui consiste en une diminution de la pression de placage lorsque H augmente même si l'incertitude de la mesure peut en être responsable.

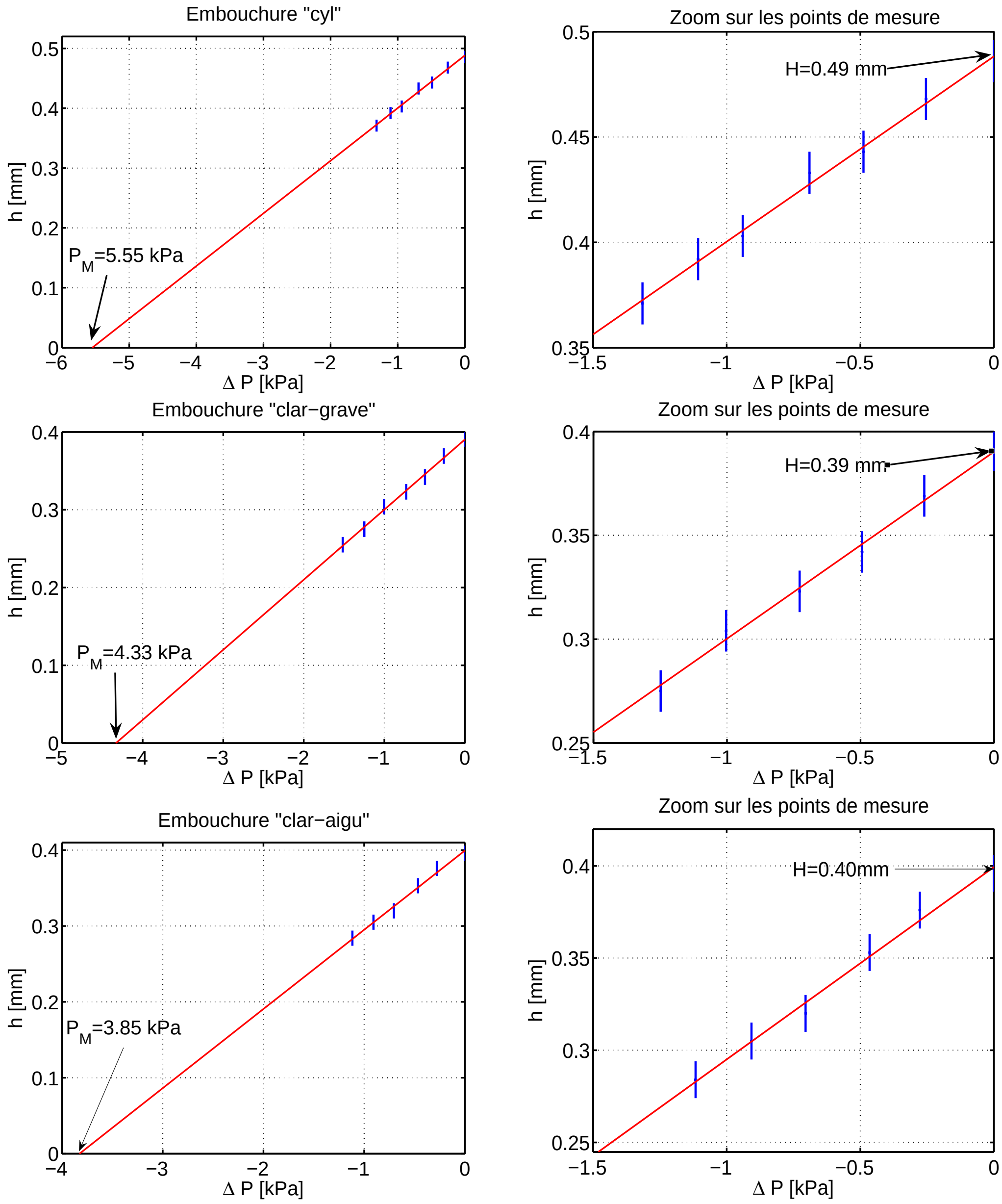


FIG. 4.5 – Détermination de la pression de placage pour les trois embouchures : en haut, celle de l'étude des cylindres, au milieu celle de l'étude de la clarinette du G3 au G5 et celle du A5 au C6 en bas.

Ceci nous donne ainsi $\zeta = 0.27 \pm 0.03$ pour l'embouchure "cyl", $\zeta = 0.25 \pm 0.03$ pour l'embouchure "clar-grave" et $\zeta = 0.26 \pm 0.03$ pour l'embouchure "clar-aigu" [4].

[4]Les valeurs de zeta obtenues ici sont inférieures à celles obtenues par Ollivier dans sa thèse [74], de l'ordre de 0.35. Les différences à la fois dans la méthode de détermination (sa méthode étant plus précise et s'affranchissant d'incertitudes comme celle sur S) ainsi que dans le réglage de l'embouchure en sont les raisons.

4.4 Mesure de la résistance glottique

Cette mesure a été réalisée en deux temps. Nous avons en premier lieu relevé la différence de pression entre la trachée juste avant la glotte et la bouche lorsque la clarinette jouait dans une nuance forte. Cette différence de pression ΔPg valait 0.32 kPa pour la configuration "ee" et 0.27 kPa pour la configuration "aw".

Nous avons ensuite démonté la clarinette et relevé, pour différents débits u_g, la différence de pression, en statique, ΔP_g. Les courbes $u_g^2 = f(\Delta P_g)$ sont consignées à la figure 4.6. L'interpolation linéaire de ces deux courbes nous donne $u_g^2 \simeq A\Delta P_g$ avec $A = 0.15 \times 10^9$ pour le "ee" et $A = 0.21 \times 10^9$ pour le "aw."

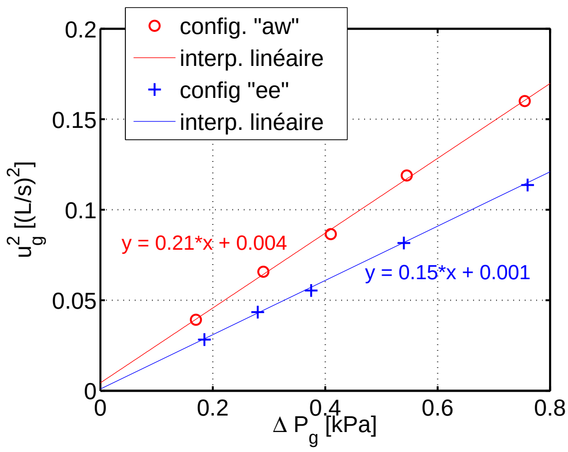


FIG. 4.6 – Courbes expérimentales $u_g^2 = f(\Delta P_g)$ pour le conduit vocal artificiel, en régime statique.

La résistance s'en déduit par

$$R_g = \frac{\mathrm{d}\,P}{\mathrm{d}\,u} = \frac{2\sqrt{\Delta P_g}}{\sqrt{A}} \tag{4.2}$$

en choisissant pour ΔP_g les valeurs mesurées en situation de jeu. Ceci conduit ainsi à une résistance $R_g = 3.0$ MPa.s.m^{-3} pour la configuration "ee" et $R_g = 2.3$ MPa.s.m^{-3} pour le "aw".

Nous retrouvons donc le même ordre de grandeur de la résistance qui avait été rajoutée empiriquement pour ajuster les simulations numériques aux mesures in vivo de l'impédance du conduit respiratoire des musiciens.

4.5 Etude sur des tuyaux cylindriques

Une acquisition temporelle de la pression dans la bouche ainsi que dans le barillet a été réalisée sur les trois tuyaux d'étude, en augmentant progressivement la pression statique dans la bouche, P_{m0}, à partir du seuil d'oscillation, pour les deux configurations de conduit vocal décrites à la section 2.5.

Les enregistrements (réalisés sur 500000 points, à une fréquence d'échantillonnage de 48000 Hz, permettant ainsi une résolution fréquentielle de 0.12 Hz) ont permis, après une analyse par transformée de Fourier et grâce à la courbe de calibration réalisée avant chaque mesure, de tracer l'évolution de la fréquence de jeu en fonction de la pression statique appliquée dans la bouche, ainsi que mettre en évidence une variation de la pression au seuil ou éventuellement l'apparition de multiphoniques.

Il est absolument indispensable, pour un tuyau donné, de faire les mesures pour les deux configurations l'une à la suite de l'autre pour être sûr d'avoir la même condition d'anche. En effet, celle-ci se fatigue beaucoup lors des expériences, en particulier lors des mesures proches du point d'extinction ce qui fait varier notablement la fréquence de jeu et la pression de seuil. D'ailleurs, pour limiter ce phénomène, il faut effectuer les mesures dans ce domaine le plus rapidement possible et bien laisser reposer l'anche une dizaine de minutes avant de recommencer une nouvelle expérience afin que l'influence de l'état de l'anche n'interfère avec les effets dûs à un changement de configuration de CV ou de tuyau.

4.5.1 Etude de la fréquence de jeu

L'évolution de la fréquence de jeu lorsque la pression dans la bouche augmente du seuil d'oscillation au seuil d'extinction est donnée sur les courbes de la figure 4.7.

L'ordonnée de ces graphiques correspond en fait à la différence, en cents, entre la fréquence de jeu et une fréquence de référence. Comme la longueur totale du résonateur est difficilement mesurable puisqu'à la longueur du tuyau et celle du barillet, il faut rajouter celle du bec, il n'était pas possible d'en déduire une fréquence qu'on aurait pu utiliser comme référence. Nous avons donc choisi arbitrairement une référence en fonction de la fréquence de jeu mesurée pour chaque tuyau, notre intérêt étant uniquement de pouvoir visualiser directement si les variations de fréquence sont perceptibles ou non. Ainsi, la référence a été prise à 201 Hz pour le tuyau long, 276.5 Hz pour le tuyau moyen et 431 Hz pour le tuyau court, ce qui ne correspond finalement pas aux fréquences du G3, du C4 et du G4 ! Ceci vient du fait qu'en raison de l'indétermination que l'on a sur la longueur effective du tuyau, en particulier à cause du bec, nous avions choisi ces longueurs suite à nos premières mesures, avec des tuyaux légèrement plus étroits et avant le réglage de la bouche par Pierre-André Taillard. Or ce réglage a considérablement changé la fréquence de jeu et nous nous en sommes rendus-compte trop tard pour réajuster la longueur des tuyaux. Ceci est dommage mais n'est cependant pas d'une importance capitale pour l'exploitation d'un certain nombre de résultats.

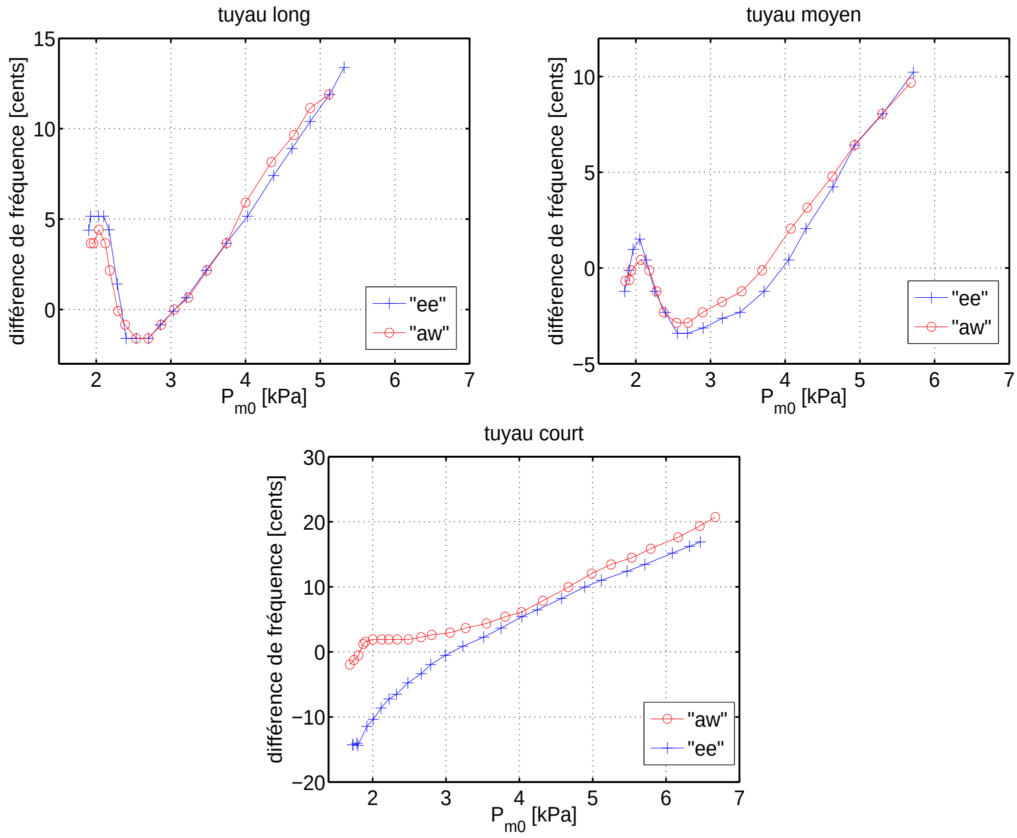


Fig. 4.7 – Evolution de la fréquence de jeu (mesurée expérimentalement) entre le seuil d'oscillation et le seuil d'extinction, pour les trois tuyaux (long, moyen et court) suivant les deux configurations de CV "ee" et "aw".

Pour les tuyaux moyen et long, même si la variation de fréquence sur la plage de jeu est grandement perceptible, aucune différence ne pourra être détectée à l'oreille entre les deux configurations "ee" et "aw", sauf bien sûr quand il apparaît des phénomènes tels que des multiphoniques. Ceci est en fait le cas sur une plage très restreinte de pression pour le tuyau long, uniquement avec la configuration "ee", ainsi que le montre la figure 4.8 (cela n'avait pas été représenté sur la figure 4.7 dans un souci de simplification car notre intérêt portait uniquement sur l'évolution de la fréquence fondamentale). Cette configuration semble donc nuire à la stabilité de la note jouée.

En revanche, pour le tuyau court, la différence de fréquence entre les deux configurations est assez importante (une dizaine de cents) au niveau du seuil et se réduit d'autant plus que la pression dans la bouche augmente.

La comparaison, dans le régime anche non battante, soit dans la gamme de pressions de 1.7 à un peu moins de 3 kPa, de ces résultats expérimentaux aux résultats numériques présentés à la figure 4.9, montre un mauvais accord. Seule la diminution de la pression de seuil avec la longueur de tuyau est vérifiée ainsi que la quasi non modification de la pression de seuil (au maximum de 0.02 kPa) par la configuration de CV. De plus, il s'avère impossible de trouver

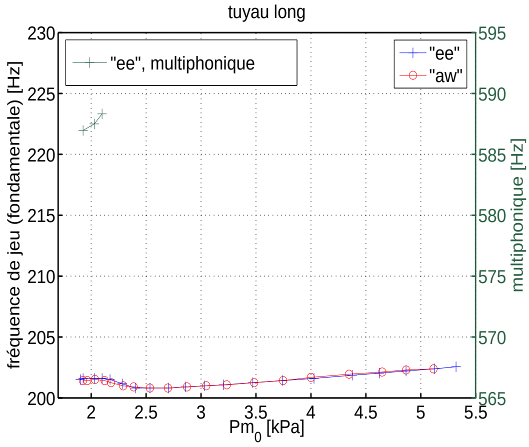


Fig. 4.8 – Mise en évidence d'un multiphonique pour le tuyau long avec la configuration "ee" au voisinage de $P_{m0} = 2$kPa. La fréquence de la note fondamentale se lit sur l'axe vertical gauche et celle du deuxième son (une douzième diminuée) sur l'axe vertical droit.

une solution numérique avec *Harmbal* dans le cas du tuyau court avec la configuration "ee".

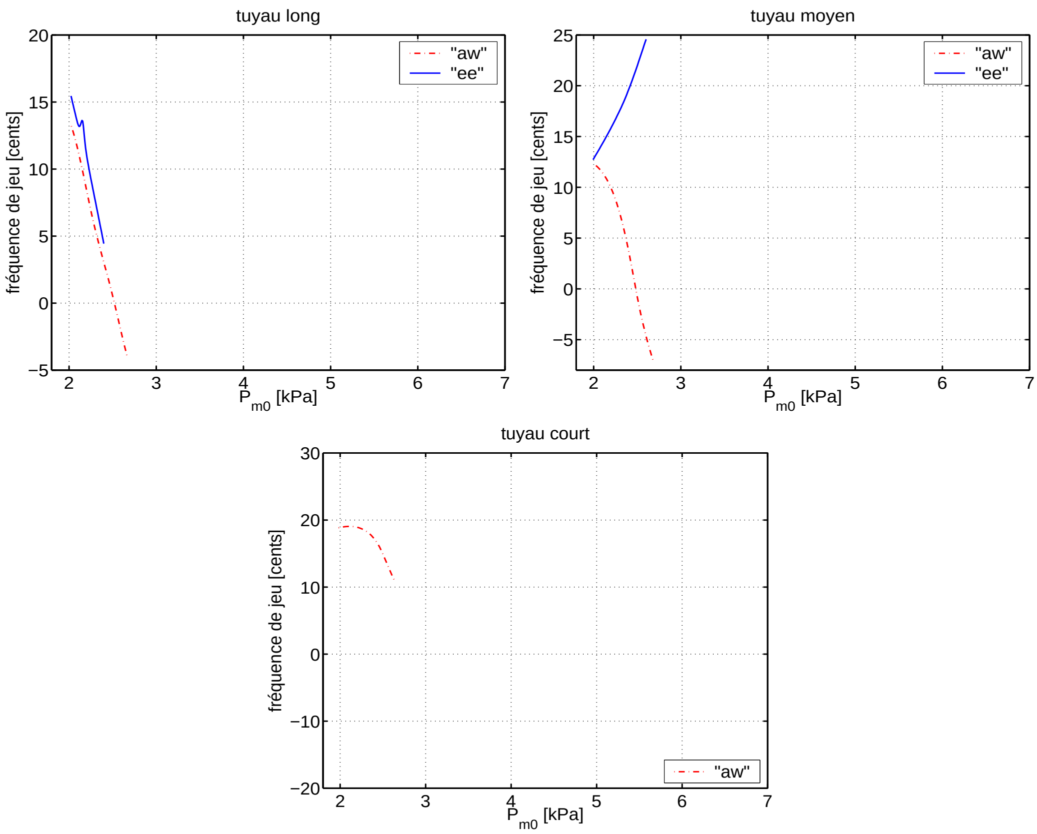


Fig. 4.9 – Evolution de la fréquence de jeu théorique entre le seuil d'oscillation et le seuil de battement, pour les trois tuyaux (long, moyen et court) suivant les deux configurations de CV "ee" et "aw". L'échelle, qui peut paraître étrange, a été choisie identique à celle de la figure 4.7.

4.5.2 Etude du spectre dans le barillet

Le spectre de pression dans le barillet est ici comparé au spectre harmonique obtenu par *Harmbal* pour ces tuyaux en question (les simulations du chapitre 3 ont été refaites pour prendre en compte la variation de fréquence mesurée par rapport à celle attendue). Un problème important résulte du fait que la pression est mesurée dans le barillet et non dans le bec. Ceci affectera principalement les amplitudes, qui en seront diminuées, des harmoniques 3 pour le tuyau court et 5 pour les tuyaux moyen et long, car dans ces cas, le capteur se trouve non loin d'un noeud de pression. Cependant, ce qui nous intéresse principalement est la comparaison, pour un tuyau donné, des deux configurations de CV, et cette comparaison n'est pas affectée par la place du capteur à partir du moment où il est fixe.

La figure 4.10 montre tout d'abord l'évolution de l'amplitude du premier harmonique. C'est pour le tuyau court qu'elle, et donc en première approximation l'amplitude du signal, est le plus affectée par un changement de configuration du CV.

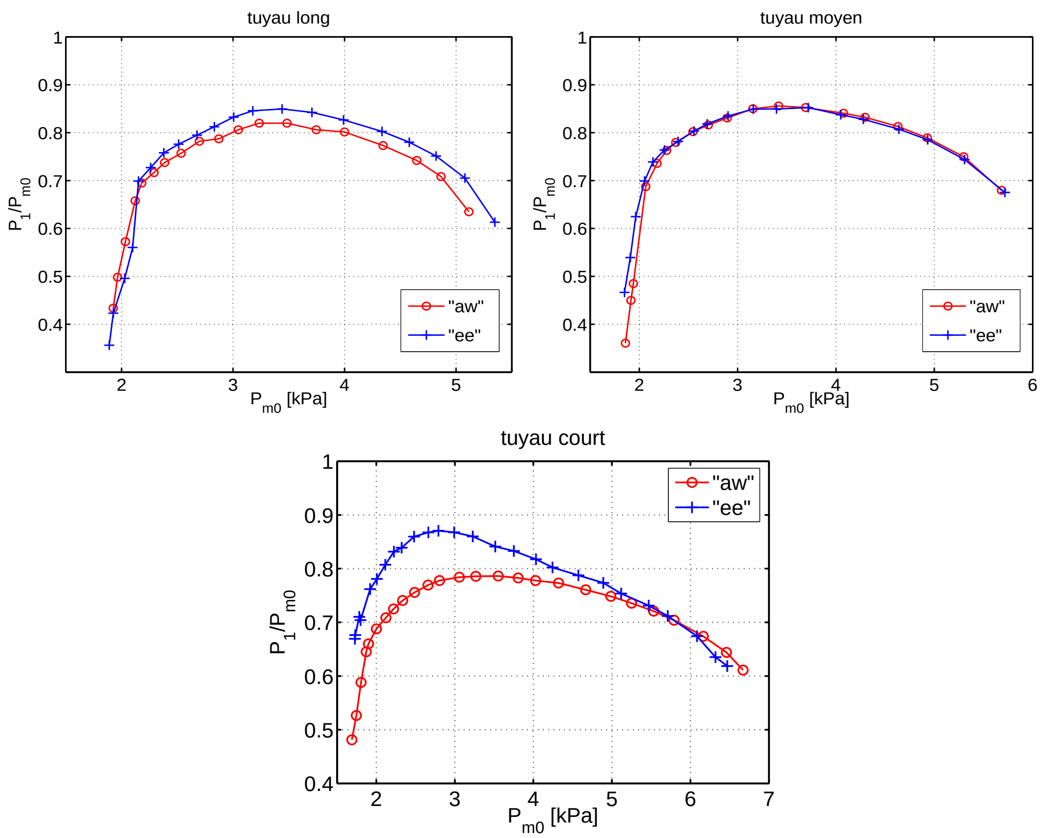


FIG. 4.10 – Evolution du premier harmonique mesuré dans le barillet, en fonction de P_{m0}, pour les trois tuyaux et les deux configurations "ee" et "aw".

Les trois figures suivantes présentent dans la colonne de gauche les résultats expérimentaux et dans la colonne de droite les résultats théoriques, obtenus avec *Harmbal* pour un nombre d'harmoniques N_p tel que la fréquence maximale soit inférieure à 4000 Hz et pour ζ et P_M choisis égaux aux valeurs déterminées au 4.3 pour l'embouchure "cyl", soit $\zeta = 0.27$ et P_M=5.55 kPa. Il est important de rappeler une nouvelle fois ici que les résultats de *Harmbal* ne sont valables qu'en régime anche battante ce qui explique pourquoi les simulations s'arrêtent vers 2.5 kPa.

Pour faciliter les comparaisons, l'échelle est la même dans les deux colonnes pour les abscisses mais n'a pu être conservée pour les ordonnées, au risque de rendre les graphiques illisibles.

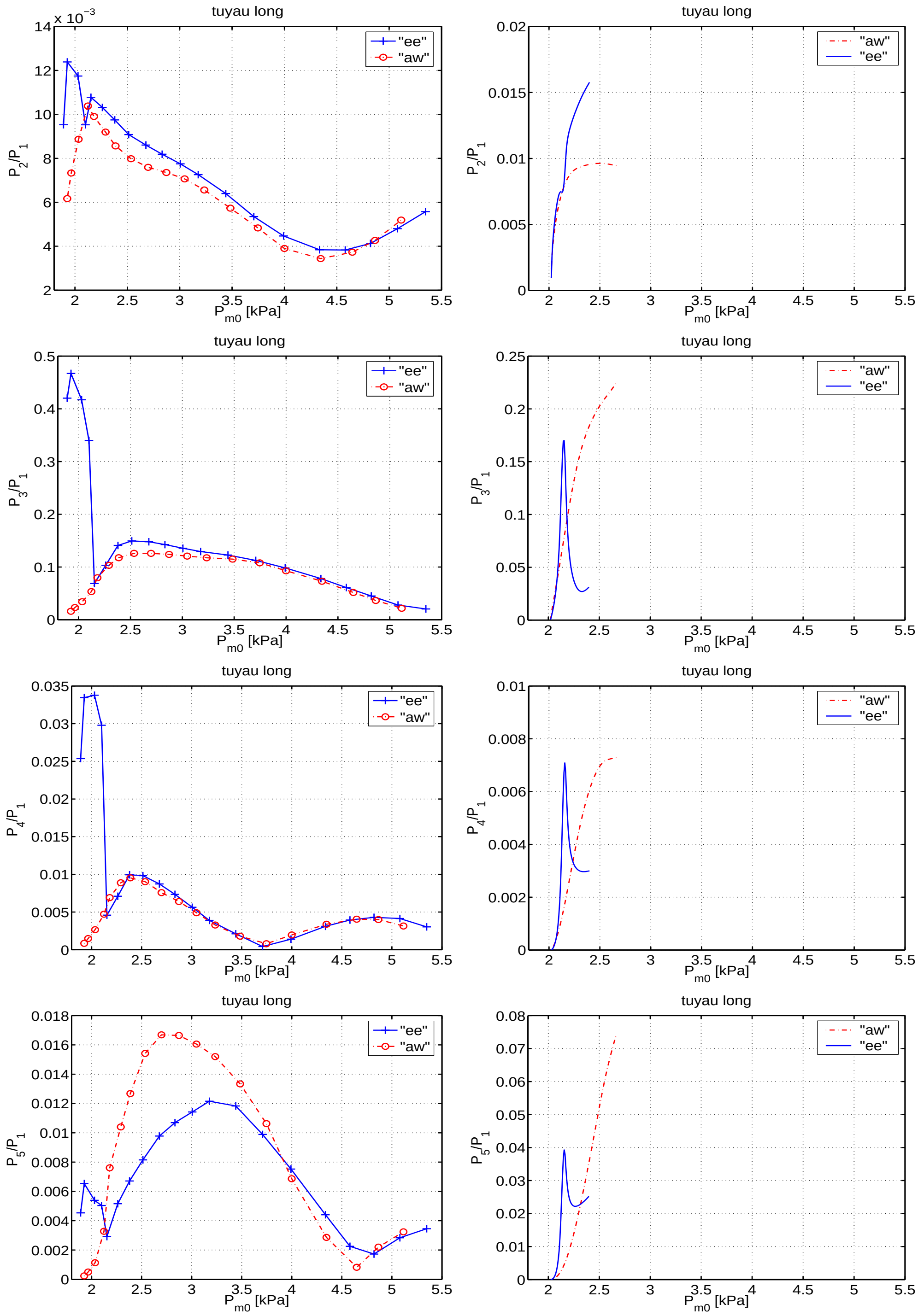


Fig. 4.11 – Evolution des différents harmoniques dans le barillet, en fonction de P_{m0}, pour le tuyau long, pour les configurations de CV "ee" et "aw" : comparaison entre expérience à gauche et simulation par *Harmbal* à droite.

L'étude de la figure 4.11 correspondant au tuyau long conduit aux remarques suivantes. Mis à part dans un voisinage du seuil où la présence d'un multiphonique en configuration "ee" perturbe grandement le spectre, le spectre expérimental est à peu près conservé lors d'un changement de configuration, sauf l'harmonique 5 qui est amplifié par le "aw". Ceci n'est pas le cas théoriquement et de surcroît les amplitudes ne correspondent guère. Alors que les harmoniques pairs sont deux à cinq fois plus élevés expérimentalement, les harmoniques impairs sont au contraire plus faibles. Ainsi, l'harmonique 5 est mesuré dix fois plus faible pour le CV "aw" qu'en théorie et la seule explication de la place du capteur près d'un noeud n'est pas suffisante puisque Sébastien Ollivier [74] avait déjà observé expérimentalement une diminution par un facteur 5 de l'harmonique 5 par rapport à la théorie. Le modèle élémentaire théorique n'est donc pas suffisamment élaboré pour prédire l'allure spectrale des signaux, même près du seuil. Une meilleure description des pertes acoustiques ainsi qu'un modèle plus élaboré de l'anche permettraient peut-être de prédire des amplitudes plus petites. Mais ceci serait l'objet d'une seconde thèse ! Le fait que les harmoniques supérieurs soient donc très nettement inférieurs en réalité peut expliquer pourquoi les sons de synthèse réalisés avec ce modèle apparaissent souvent trop chargés en harmoniques aigus.

Les courbes expérimentales de la figure 4.12 correspondant au tuyau moyen montrent une différence plus importante du spectre entre les deux configurations "ee" et "aw", différence qui n'est pas aussi visible sur les courbes théoriques. Sur le plan quantitatif, les conclusions sont très similaires à celles du tuyau long : harmoniques pairs en réalité plus élevés et harmoniques impairs plus faibles.

La figure 4.13 n'apporte rien de nouveau quant à la comparaison entre expérience et théorie par rapport au tuyau moyen, mais elle permet de voir une progression dans les différences observées dans le spectre (mesuré expérimentalement) pour deux configurations de CV : l'influence du CV augmente lorsque la longueur du tuyau diminue. Ceci résulte du fait que plus la fréquence de jeu est élevée, plus de faibles changements de volume ou de section ont un effet important.

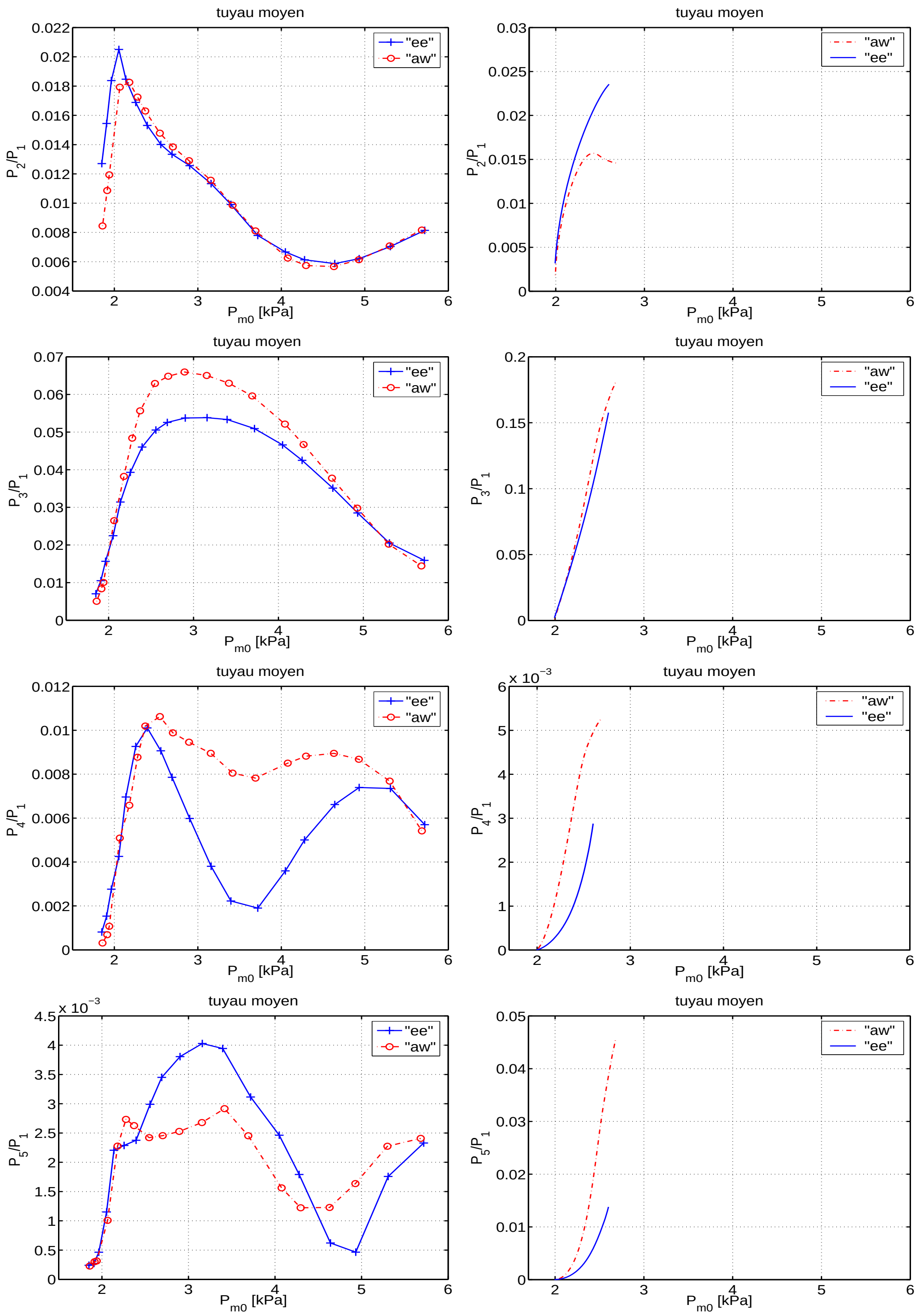


Fig. 4.12 – Evolution des différents harmoniques dans le barillet, en fonction de P_{m0}, pour le tuyau moyen, pour les configurations de CV “ee” et “aw” : comparaison entre expérience à gauche et simulation par *Harmbal* à droite.

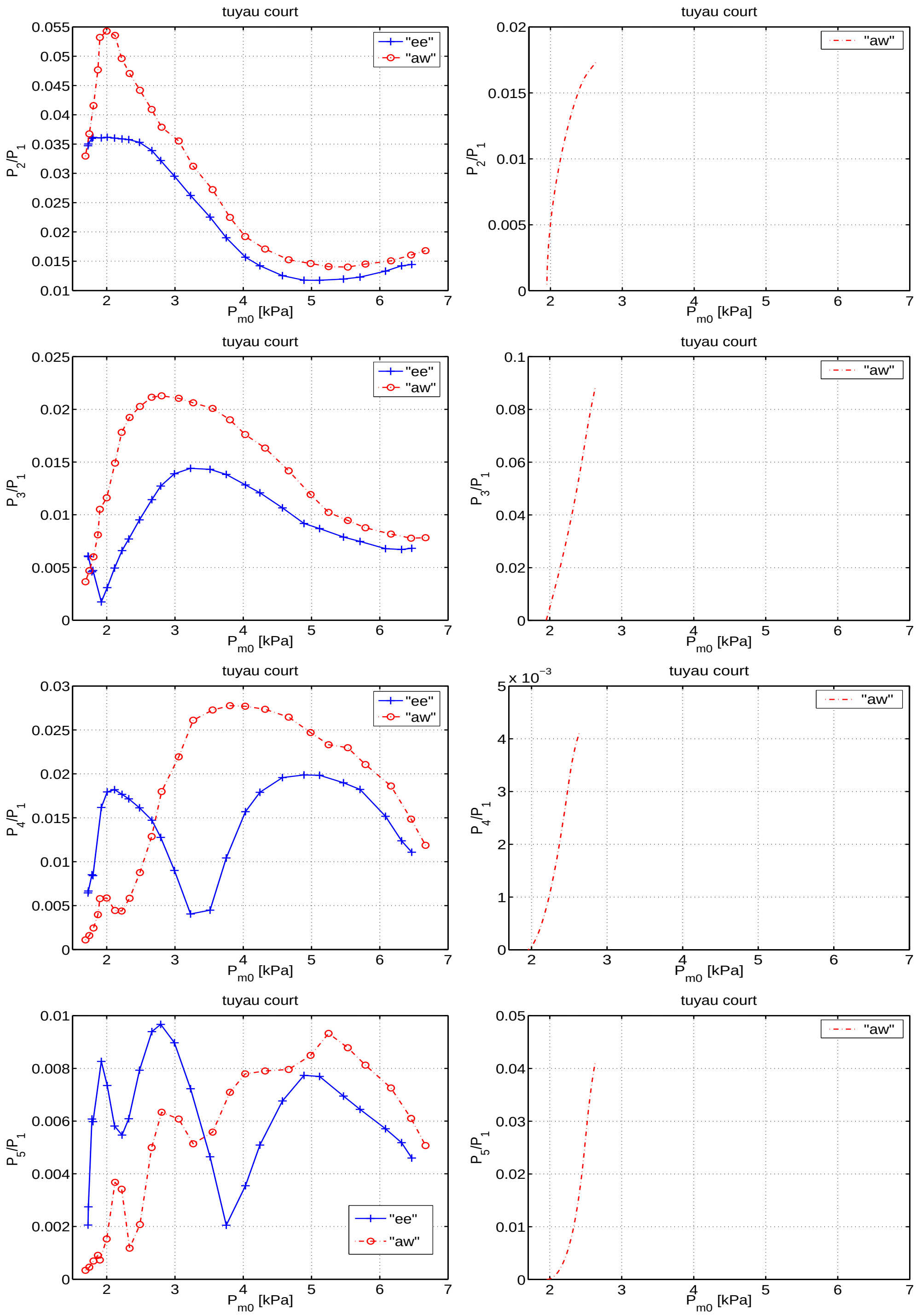


FIG. 4.13 – Evolution des différents harmoniques dans le barillet, en fonction de P_{m0}, pour le tuyau court, pour les configurations de CV "ee" et "aw" : comparaison entre expérience à gauche et simulation par *Harmbal* à droite (aucune solution numérique trouvée dans le cas de la configuration "ee").

4.5.3 Etude du spectre dans la bouche

Examinons maintenant, comme nous l'avons fait pour les signaux de pression dans le barillet, l'évolution du spectre dans la bouche, en fonction de P_{m0}, pour les différents tuyaux et les deux configurations de conduit vocal. Etant donnée la différence d'impédance entre la configuration "ee" et la configuration "aw", on s'attend à ce que dans l'ensemble, les harmoniques supérieurs soient beaucoup plus importants dans le cas du "ee", avec un renforcement particulier lorsque l'harmonique tombe sur le pic principal, dans la zone 800-1000 Hz. Ceci est bien vérifié ainsi que le montrent les figures suivantes (seules les plus pertinentes sont ici présentées).

La figure 4.14 montre l'opposition entre un cas où l'harmonique de la note jouée tombe sur un pic du "ee" et un creux du "aw" (harmonique 3 pour le tuyau moyen) et le cas où l'harmonique tombe dans une zone où les deux impédances sont similaires (harmonique 5 pour le tuyau court) : la différence d'impédance se reflète parfaitement dans le comportement des harmoniques puisque dans le premier cas, l'amplitude de l'harmonique 3 est une dizaine de fois supérieur pour le "ee" que pour le "aw" alors que dans le deuxième cas, les deux amplitudes de l'harmonique 5 sont du même ordre de grandeur.

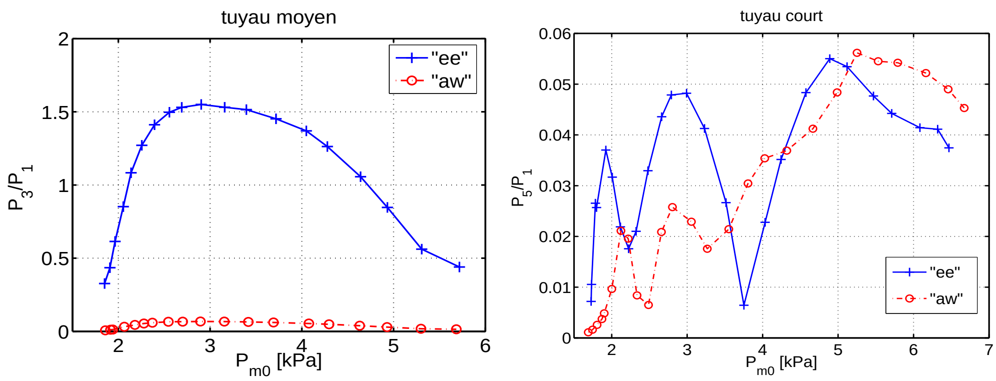


Fig. 4.14 – Evolution des rapports, dans la bouche, entre l'harmonique 5 et l'harmonique 1 pour le tuyau court et entre l'harmonique 3 et l'harmonique 1 pour le tuyau moyen, en fonction de la pression statique dans la bouche P_{m0}.

La figure 4.15 permet quant à elle de montrer que dans la bouche, les harmoniques pairs sont loin d'être négligeables et peuvent même être prépondérants. L'harmonique 4 peut être ainsi jusqu'à cinq fois supérieur à l'harmonique 3 pour le tuyau long.

L'influence du conduit vocal sur le spectre dans la bouche s'explique donc aisément à partir de sa seule impédance. Lorsqu'un harmonique se trouve dans une zone de fréquence où l'impédance est importante, son amplitude augmente notablement. Cependant, ceci ne permet en rien de prédire de tels effets dans le spectre dans la clarinette. Ainsi, si nous comparons les figures 4.11, 4.12 et 4.13 avec les figures 4.14, et 4.15, nous ne pouvons trouver aucune corrélation entre le renforcement de tel ou tel harmonique dans le spectre de la clarinette par rapport à celui de la bouche. Le cas de l'harmonique 3 du tuyau moyen en est un exemple flagrant : alors que dans la bouche il est une dizaine de fois supérieur pour la configuration "ee" que pour la configuration "aw", il est légèrement inférieur dans le barillet pour le "ee" par rapport au

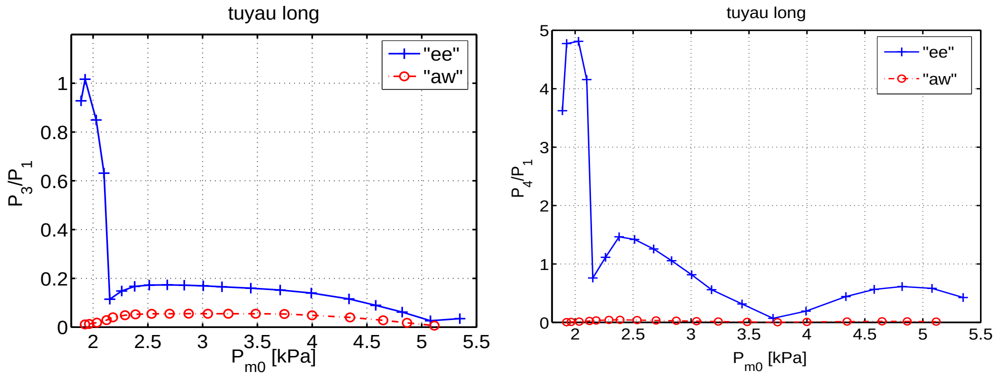


Fig. 4.15 – Evolution des rapports harmonique 3 / harmonique 1 et harmonique 4 / harmonique 1 dans la bouche pour le tuyau long, en fonction de P_{m0}.

"aw" ! Nous retrouvons par conséquent les résultats de Benade [11] quant au découplement important des deux résonateurs (clarinette et conduit vocal) par l'anche de sorte que, concluait-il, un changement de l'un n'affecte principalement que la pression du côté de celui-ci. Cependant quelques restrictions et précisions doivent être apportées suite à notre étude.

Ceci n'est en fait vrai qu'en ce qui concerne la modification du CV, car elle n'entraîne qu'une faible variation de fréquence de jeu. Au contraire, la modification de l'impédance de la clarinette d'un doigté à l'autre va faire varier la fréquence de jeu de manière importante et donc pour une impédance de CV donnée, les harmoniques vont tomber à des endroits différents de cette impédance de sorte qu'ils seront plus ou moins présents. Le spectre dans la bouche sera donc grandement modifié et il est d'ailleurs assez saisissant de voir varier sur l'oscilloscope la forme d'onde dans la bouche, par opposition à la forme d'onde dans le barillet qui reste stable, lorsqu'on fait une gamme dans le grave, ce que nous verrons dans l'étude sur une vraie clarinette, aux figures 4.20 à 4.22.

De plus, il faut préciser la conclusion de Benade : une augmentation de l'harmonique 3 dans la bouche n'implique effectivement pas forcément une augmentation de l'harmonique 3 dans la clarinette. Mais ceci ne signifie pas qu'il n'est pas possible de renforcer l'harmonique 3 dans la clarinette grâce au CV ! Les figures 4.23 et 4.24 que nous étudierons dans la partie suivante sur la clarinette en témoignent bien.

L'intérêt de notre étude étant quand même la clarinette, il est inutile de s'attarder davantage sur les tuyaux, et les points qui n'ont pas été abordés ici, comme l'allure temporelle des signaux dans la bouche et dans le bec, le seront dans la partie suivante.

4.6 Etude sur une vraie clarinette

En premier lieu, nous avons procédé de manière identique au paragraphe précédent : les pressions dans le bec et dans le barillet ont été enregistrées sur toute la plage de jeu, du seuil

d'oscillation au seuil d'extinction, et ceci pour différents doigtés de la clarinette (les trous étaient bouchés grâce à de la pâte style "patafix").

En second lieu, suite à des échanges avec des clarinettistes, nous avons cherché à mettre en évidence certains effets que pourraient engendrer l'une ou l'autre configuration dans des transitions délicates, dans l'émission du suraigu ou bien près du seuil.

4.6.1 Etude de notes particulières

Les doigtés (la notation se fait ici en note écrite, cf annexe G) ont été choisis afin d'être représentatifs de différents cas de figure : le G3 correspond à un "tuyau long", le C4 à un "tuyau moyen" et le G4 à un "tuyau court". Les musiciens notent en effet une grande différence entre les notes dites à tuyau long, qu'il est difficile d'influencer par l'action du conduit vocal, et les notes à tuyau court, où au contraire le conduit vocal a une influence prépondérante. D'autre part, deux douzièmes ont été étudiées : le D5 qui correspond au doigté du G3 avec la clé de registre ouverte et le G5 qui correspond au C4. Nous avons également étudié l'aigu et le suraigu avec les notes A5, B5, C6 et E6. Les fréquences de référence, dans la gamme tempérée, de ces notes sont données dans le tableau récapitulatif suivant 4.1.

Note	G3	C4	G4	D5	G5	A5	B5	C6	E6
Fréquence	175	233	349	523	698	784	880	932	1175

Tab. 4.1 – Fréquence de référence en notation écrite (en Hz) des notes de l'étude.

Etude de la fréquence de jeu et des seuils

La figure 4.16 consigne l'évolution de la fréquence de jeu en fonction de P_{m0} pour les notes du chalumeau et du clairon.

La fréquence de jeu pour les notes G3 et C4 présente la même évolution que pour les tuyaux long et moyen mais ce n'est pas le cas pour la note G4 en comparaison du tuyau court. Deux explications possibles à ce phénomène : la clarinette avec toutes les clés ouvertes ne se comporte pas de la même manière que le tuyau de longueur équivalente ou bien, la fréquence du tuyau court s'avérant en fait bien plus élevée que la fréquence du G4, la courbe d'évolution du tuyau court se rapproche plus de celle de D5 que de celle de G4. Il semble en effet y avoir une différence importante de comportement entre les notes de G3 à G4 et celles de D5 à C6 (l'allure des courbes pour les notes A5 et C6 est donnée à la figure 4.18 mais nous en reparlerons plus précisément au paragraphe suivant) : la baisse importante de la fréquence pour les notes graves n'est en effet pas observée pour les notes plus aiguës.

En ce qui concerne la pression de seuil, la configuration "ee" l'abaisse systématiquement par rapport à la configuration "aw", de manière croissante lorsque la fréquence de jeu augmente : de 0.1-0.2 kPa pour le G3 à 0.7 kPa pour le G5. Toujours à propos de la pression de seuil, nous retrouvons bien l'effet obtenu numériquement et expliqué par la longueur de tuyau effective au paragraphe 3.6.3, qui consiste en un abaissement progressif de la pression de seuil lorsque l'on monte du G3 au G4 suivi d'une augmentation en passant à la note D5, jouée sur la deuxième résonance du G3 à l'aide du trou de registre.

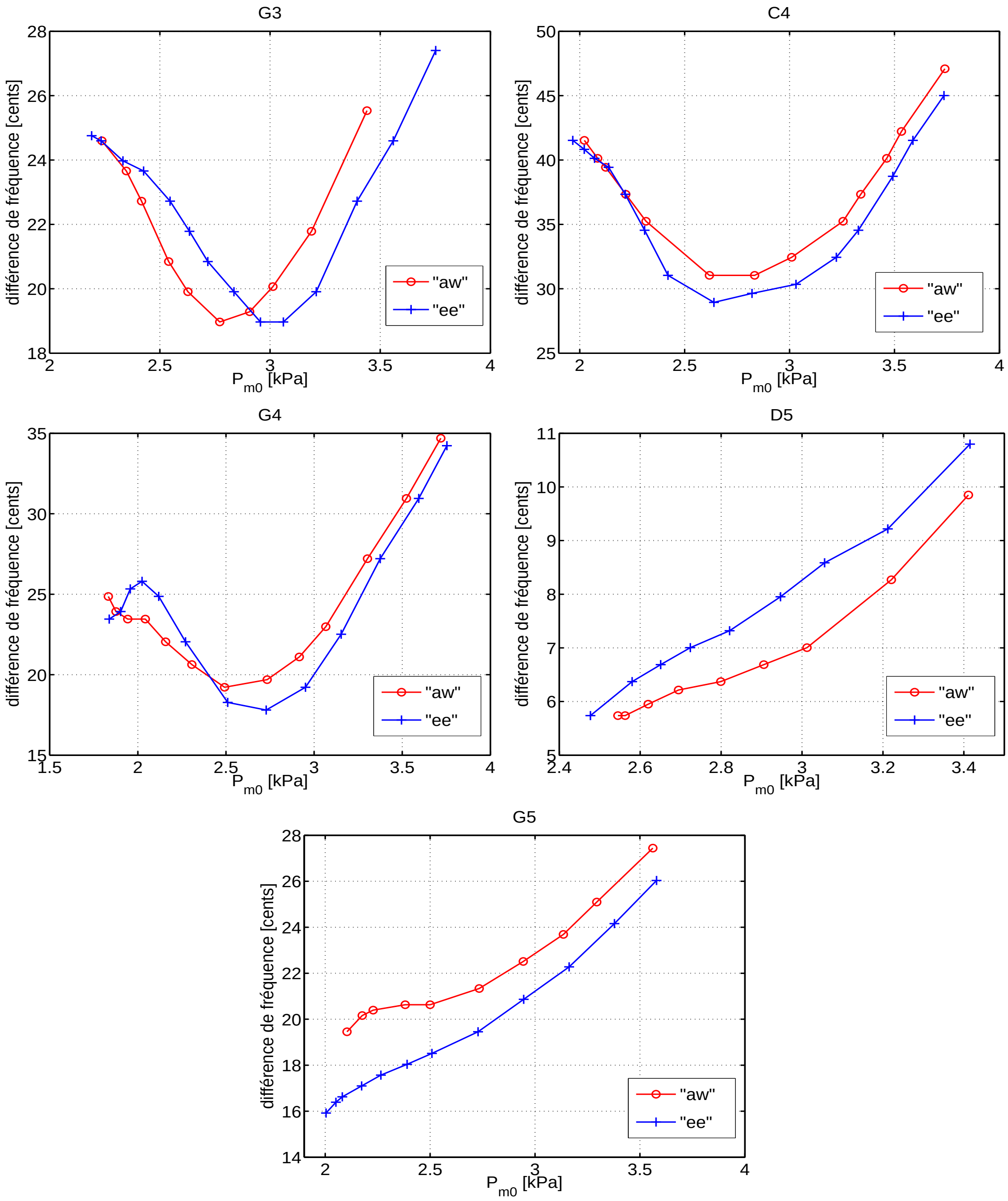


FIG. 4.16 – Différence en cents entre la fréquence de jeu et la fréquence de référence de la gamme tempérée (G3 à 175Hz, C4 à 233Hz, G4 à 349Hz, D5 à 523Hz et G5 à 698Hz), en fonction de la pression statique dans la bouche P_{m0}, pour les deux CV “ee” et “aw”.

Ceci est à peu près le seul effet que l'on retrouve numériquement. Ainsi, si l'on compare cette figure à la figure 3.21 (P_M =5.5 kPa donc $\gamma = 0.5$ correspond à P_{m0}=2.75 kPa), nous ne pouvons constater qu'un très médiocre accord entre les deux. Alors que la fréquence de jeu calculée par *Harmbal* était quasi systématiquement obtenue supérieure pour la configuration “ee”, ceci est loin d'être le cas expérimentalement. Et ceci est d'ailleurs une énigme de plus car c'est contraire à l'opinion des musiciens. D'autre part, contrairement à la théorie, la différence

expérimentale entre les deux configurations est négligeable sauf dans le cas du G5 où elle devient perceptible.

Par ailleurs la fréquence augmente avec P_{m0} pour tous les doigtés, au-dessus de 3 kPa. Ce phénomène, déjà expliqué par Bouasse [12], résulte du fait qu'au-dessus de cette pression, l'anche bat. Cependant, cette hausse de fréquence pour les trois notes graves vers le seuil d'extinction apparaîtra certainement très étonnante au clarinettiste, généralement habitué à voir ces note baisser quand il souffle plus fort. Cependant, en technique de jeu allemande (cf annexe G, section G.3), cette évolution de la fréquence, qui baisse puis remonte fortement lorsque P_{m0} augmente, est également observée. Or dans cette technique, l'influence de la pression des lèvres est négligeable de sorte que le musicien est quasiment sûr de ne pas la faire varier lorsqu'il change de configuration de conduit vocal ou bien lorsqu'il augmente la pression, ce qui permet ainsi une comparaison directe avec la bouche artificielle. En revanche, en technique de jeu française, le maintien d'une tension musculaire constante provoque une diminution de la pression exercée par la lèvre sur l'anche au fur et à mesure de l'augmentation de pression d'air dans la bouche. Elle cause en effet une dilatation des joues tendant à ouvrir les lèvres, ce qui provoque une baisse de fréquence par augmentation de la longueur libre de l'anche et rend la pression nécessaire pour arriver au seuil d'extinction inhumaine à soutenir. Ces deux effets expliquent qu'un musicien, avec la technique française, n'explorera que la partie de la courbe où la fréquence baisse.

Ceci nous a été illustré par Pierre-André Taillard, qui, contrairement à beaucoup de clarinettistes, utilise le régime près du seuil d'extinction, en particulier pour obtenir un pianissimo évitant d'une part la hausse d'intonation du pianissimo classique (car il y a moins besoin de serrer l'embouchure), et d'autre part les bruits de chuintement et de souffle du pianissimo au seuil d'oscillation (qui n'est utilisable que dans une grande salle). L'expérience fut la suivante. Nous avons enregistré le son de P.A. Taillard dans le barillet dans trois situations différentes : au seuil d'oscillation (abscisse 0 dans la figure 4.17) et au seuil d'extinction (abscisse 2) ainsi qu'au minimum de fréquence quand il y en avait un, ou sinon à peu près au milieu entre les deux seuils (abscisse 1), et ceci pour deux configurations, l'une de type /i/, l'autre de type"aw" ou /æ/ (grande cavité buccale). Pour la mesure au seuil d'oscillation, le clarinettiste partait en fait du mezzo forte avant de diminuer la pression puis faisait signe pour lancer l'enregistrement : le decrescendo du mezzo forte au pianissimo permet en effet d'éviter l'instabilité au seuil d'oscillation et donc de mieux garantir une configuration de conduit vocal constante. L'expérience a été réalisée sur la clarinette du laboratoire, mais le bec a été remplacé pour ne pas démonter la bouche artificielle qu'il nous avait coûté de régler (trois à quatre heures !). P.A. Taillard a donc utilisé son propre bec (M30) avec une anche "réglée à l'allemande" pour limiter l'effet de la pression des lèvres, soit un patch L (qui permet de ne pas presser trop fort sur l'anche) et une anche G+S French I Force 4 très âgée.

L'accord entre les résultats obtenus à la figure 4.17 et ceux obtenus avec la bouche artificielle est assez remarquable en ce qui concerne l'évolution de la fréquence avec la pression : les ordres de grandeur des variations sont les mêmes et nous observons bien cette remontée de la fréquence de jeu pour les notes graves. Nous pouvons aussi constater que la fréquence de jeu semble être parfois inférieure pour le /æ/ que le /i/ même si, pour cet effet-ci, la "significativité" des résultats aurait méritée d'être testée en refaisant l'expérience plusieurs fois (ce qui n'a bien entendu pas été fait par manque de temps : la venue de Pierre-André Taillard fut de beaucoup trop courte durée !). En revanche, la bizarre inversion des fréquences de jeu pour la note G5 n'est pas retrouvée. Ceci peut être dû au fait, que même avec une anche réglée à l'allemande,

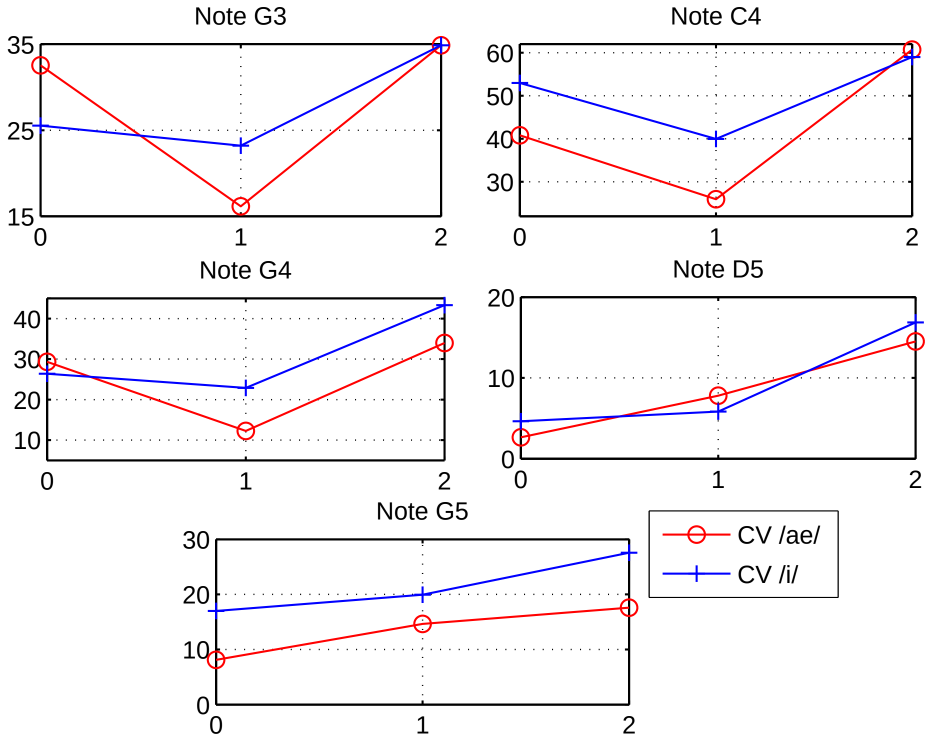


FIG. 4.17 – Mesures d'intonation (différence de fréquence en cents entre la fréquence jouée et la fréquence de référence) réalisées lorsque Pierre-André Taillard joue, sur la clarinette du laboratoire, les cinq notes graves de l'étude, au seuil d'oscillation et d'extinction (abscisse 0 et 2) ainsi qu'au milieu (abscisse 1). Les échelles verticales ont été choisies de sorte à avoir à peu près, pour chaque note, la même plage de variation qu'à la figure 4.16.

il est très difficile de s'affranchir totalement des mouvements de mâchoire.

Ces résultats, obtenus sur la bouche artificielle et par P.A. Taillard, diffèrent des mesures de Bak et Domler[10]. Ils ont ainsi mesuré, sur leur dispositif artificiel, une augmentation de la fréquence avec la pression, qu'ils n'ont pas retrouvée chez le musicien professionnel qu'ils ont enregistré, pour lequel la fréquence diminuait progressivement. Ils en avaient conclu qu'un musicien est difficilement capable de garder la pression des lèvres constante lorsqu'il souffle plus fort. D'après ce qui précède, nous pouvons donc en déduire que sa technique de jeu était plutôt de type française de sorte que la remontée de fréquence n'a pu être mesurée comme sur P.A. Taillard. Il reste en revanche inexpliqué pourquoi, contrairement à eux, nous avons mesuré une baisse de fréquence pour les notes plutôt graves, avant que l'anche ne batte. Il semblerait donc, au vu de nos mesures, que la modification de la pression des lèvres du musicien ne soit pas seule responsable de la baisse de fréquence lorsque la pression dans la bouche augmente. Elle l'est seulement à forte pression, en technique de jeu française.

En ce qui concerne l'aigu et le suraigu, ils ont été testés d'une part avec la même embouchure que précédemment (embouchure "clar-grave") et d'autre part avec une embouchure un peu mieux optimisée pour l'aigu en diminuant très légèrement la pression d'eau dans les lèvres

(embouchure “clar-aigu”) permettant d’obtenir plus de notes, comme par exemple le B5 et le E6. Les résultats sont respectivement présentés à la figure 4.18 et à la figure 4.19.

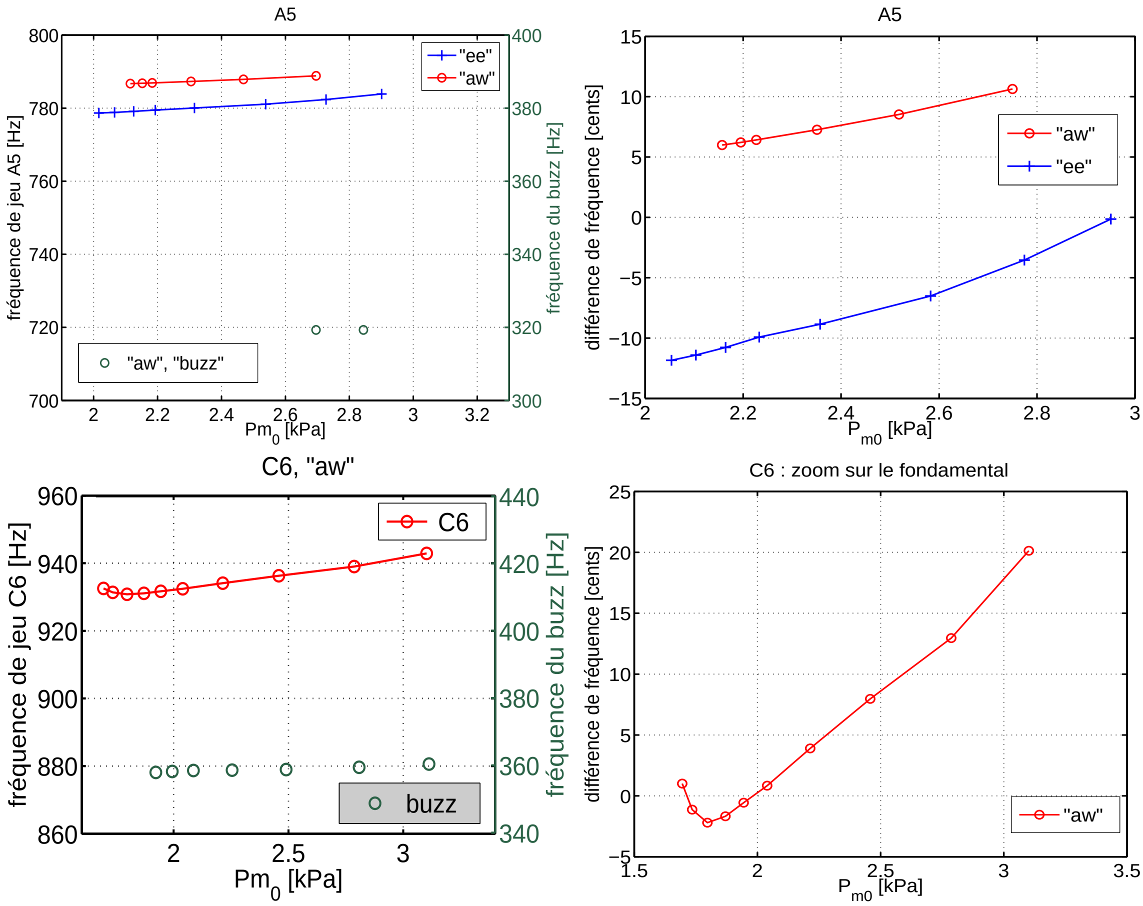


Fig. 4.18 – Fréquence de jeu pour les notes A5 (784 Hz) et C6 (932 Hz) obtenue avec l’embouchure “clar-grave”

Dans la plupart des cas, nous avons observé, au moins pour certaines pressions, l’apparition de multiphoniques constitués de la note en question d’une part et d’autre part de, soit le buzz du fondamental, qui correspond à la note jouée sur le partiel 1, c’est-à-dire un peu moins qu’une douzième en dessous en raison de l’ouverture du trou de registre (environ une dixième), soit une note supérieure, comme le F#6-G6 dans le cas du B5. Nous avons alors choisi de présenter les résultats sous deux formes : d’un côté la différence en cents entre la fréquence de la note jouée (sans tenir compte du multiphonique) et la fréquence de référence pour une évaluation aisée de la perceptibilité des effets et de l’autre côté une représentation directe des fréquences en Hz avec la fréquence de jeu de la note en question sur l’axe vertical gauche et la fréquence de l’autre son du multiphonique sur l’axe vertical droit (la séparation des axes permet de mieux voir l’évolution des fréquences en fonction de la pression statique dans la bouche). Un multiphonique est caractérisé par deux fréquences pour une pression donnée (par conséquent sur une même verticale). Le summum du compliqué est atteint pour la note B5 avec la configuration “aw” où l’apparition d’un multiphonique à la pression 2.1 kPa est suivie d’une oscillation sur cette deuxième note jusqu’à 3.2 kPa puis d’un rebasculement sur B5 jusqu’à

l'extinction, le tout présentant un fort hystérésis lorsque l'on rediminue la pression !

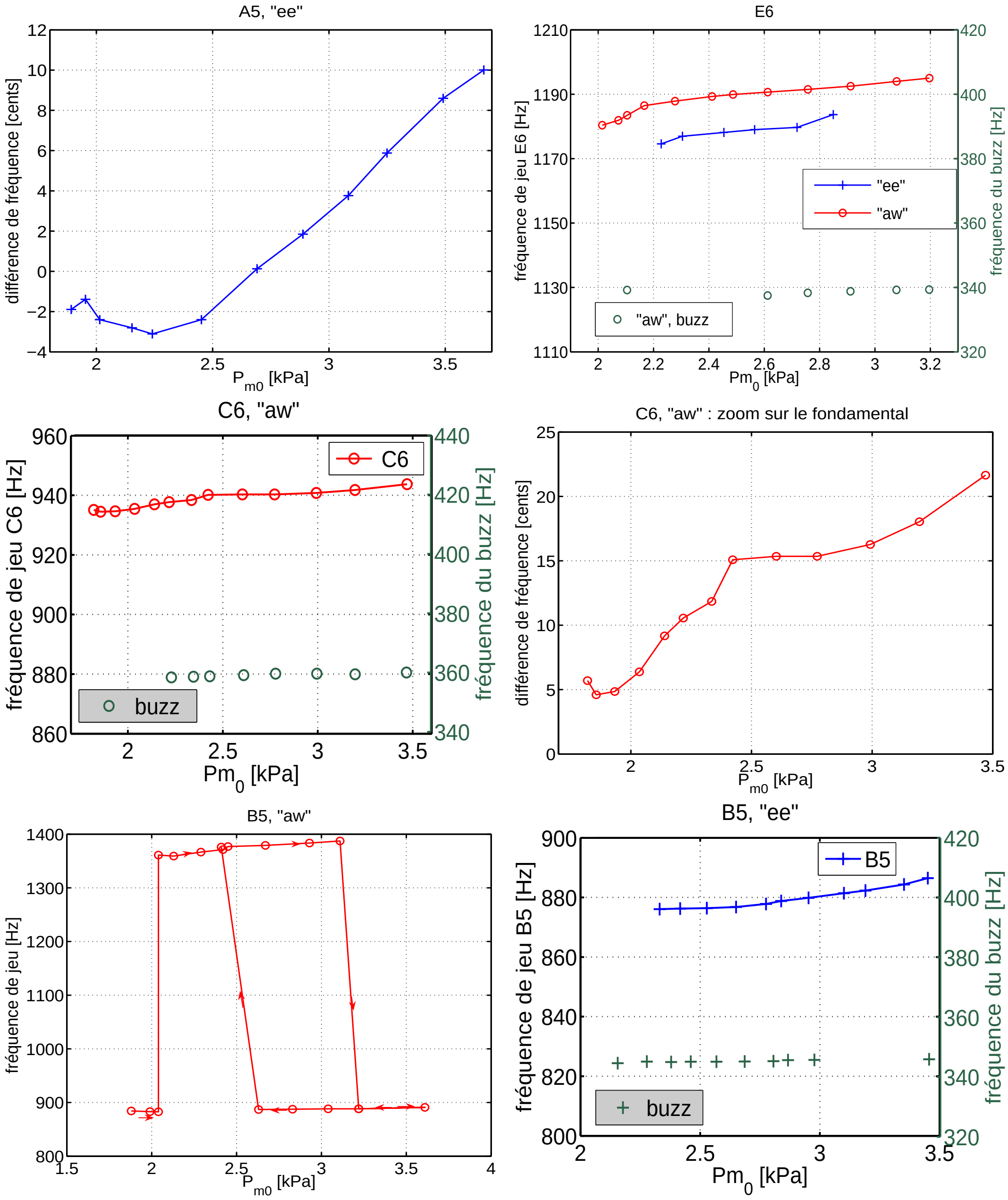


Fig. 4.19 – Fréquences de jeu pour les notes A5, B5, C6 et E6, obtenues avec l'embouchure "clar-aigu".

Maintenant que les explications pour la compréhension des figures ont été données, discutons un peu plus les résultats obtenus pour les deux embouchures.

En ce qui concerne l'embouchure "clar-grave", la configuration "ee" améliore nettement l'émission de la note A5 : le seuil d'oscillation est abaissé et le seuil d'extinction repoussé, ce qui augmente considérablement la plage de jeu. De plus, il ne donne pas lieu à des sons multiphoniques comme la configuration "aw". A l'inverse, il ne permet pas d'obtenir la note

C6, contrairement au “aw” qui la produit pure pour des pressions très faibles puis entachée du buzz du fondamental lorsque la pression augmente. Enfin, la note B5 n’a pu être obtenue avec aucune des deux configurations et la note E6 n’a été permise que par le “ee”, mais sur une gamme de pression très réduite de 2.42 à 2.60 kPa (au-dessus, nous obtenions le buzz).

Avec l’embouchure “clar-aigu”, le “aw” ne permettait plus l’émission de la note A5 qui sautait au F#6, ainsi que toutes les autres notes du clairon qui sortaient à la douzième supérieure, mais par contre permettait bien mieux, dans l’ensemble, d’obtenir la fin du registre aigu (B5 et C6) et le suraigu (par exemple E6) que le “ee”. Ainsi le E6 n’a pu être obtenu pour le “ee” qu’en fermant à moitié l’index gauche au lieu de le laisser complètement ouvert. De plus, les pressions d’obtention sont en général plus faibles que pour les registres grave et médium. Ceci confirme les instructions de Marchi [62] pour bien réussir l’émission du suraigu : il faut augmenter le volume buccal en abaissant la langue et le maxillaire inférieur [...] de manière à faire baisser la pression de l’air contenu dans la bouche .

A propos de la fréquence de jeu des notes étudiées (sans tenir compte des multiphoniques), elle monte systématiquement lorsque la pression dans la bouche augmente, mis à part une légère baisse au voisinage du seuil. De plus, la variation de la fréquence pour les notes A5 en configuration “ee” et C6 en configuration “aw” est la même pour les deux embouchures, à une translation près vers le haut d’une dizaine de cents pour l’embouchure “cyl-aigu”, ce qui constitue une énigme puisque le desserrement de l’embouchure (la pression d’eau dans les lèvres a en effet été abaissée) aurait dû plutôt conduire à une baisse de fréquence. D’autre part, pour les trois notes où une comparaison des fréquences est possible entre les deux configurations de CV, soit A5, B5 et E6, la fréquence est 15 à 20 cents plus élevée pour le “aw” que pour le “ee” ce qui n’est certainement pas intuitif pour les clarinettistes ! Enfin, aucune corrélation n’est possible entre ces résultats expérimentaux et les résultats théoriques vus au paragraphe 3.6.3 puisque ni les effets sur la fréquence de jeu ni les effets sur les pressions de seuil ne correspondent. Nous n’avons pas encore pu déterminer à ce jour les paramètres qui pourraient expliquer une telle discordance mais certaines lacunes du modèle qui pourraient en être responsables seront discutées ultérieurement.

Etude de la pression dans le barillet et dans la bouche

Intéressons-nous maintenant à la forme d’onde des signaux de pression dans le barillet ainsi que dans la bouche, pour les doigtés qui ne présentent pas de multiphoniques, soit du G3 au A5. Les figures 4.20 à 4.22 donnent, pour chaque note, les formes d’onde pour trois ou quatre niveaux de pression statique dans la bouche et pour les deux configurations de CV “ee” et “aw”.

Notez les deux effets inverses lors de la lecture progressive de ces figures : alors que l’amplitude maximale obtenue dans le barillet diminue au fur et à mesure que l’on monte en fréquence (2 kPa pour G3 contre 0.3 kPa pour A5), celle dans la bouche augmente énormément pour le “ee” (0.2 kPa pour G3 contre 0.9 kPa pour A5), et le signal devient simultanément plus sinusoïdal. Ceci est dû au fait que la fréquence de jeu se rapproche de plus en plus du pic principal de résonance du “ee” vers 920 Hz et au fait qu’en dehors de ce pic, l’amplitude de

l'impédance reste faible. Donc d'une part l'amplitude des harmoniques supérieurs va diminuer puisqu'à partir de 500 Hz, plus aucun harmonique ne pourra correspondre à une fréquence proche de 900 Hz, et inversement, l'amplitude du fondamental va augmenter nettement quand la fréquence de jeu se rapproche de 900 Hz. Les mêmes phénomènes permettent également d'expliquer pourquoi le signal est beaucoup plus chahuté dans la bouche pour le "ee" que pour le "aw" pour les notes graves, puisque pour le "ee", il y a nécessairement un harmonique supérieur qui sera renforcé (qu'il soit pair ou impair). Par ailleurs, à l'inverse du "ee", l'amplitude du signal de pression dans la bouche pour le "aw" tend à diminuer lorsque la fréquence de jeu augmente (0.2 kPa pour G3 contre 0.08 pour A5), ce qui peut s'expliquer par le fait que c'est dans la région 150-400 Hz que l'impédance du "aw" est la plus grande.

Comme aucune corrélation n'avait été trouvée pour les tuyaux entre le spectre dans le barillet et le spectre dans la bouche (ni ne sera d'ailleurs trouvée pour la clarinette comme nous le verrons au paragraphe suivant), nous avons cherché une corrélation dans le domaine temporel. Ainsi, il nous est apparu que l'amplitude des signaux dans la bouche et dans le bec variait en sens inverse lorsque la fréquence de jeu augmente pour la configuration "ee" (celle dans la bouche augmente alors que celle dans le barillet diminue). Ceci n'est cependant pas le cas pour la configuration "aw" (les deux signaux sont ainsi plus importants pour la note C4 que pour la note D5) et une autre corrélation doit être de ce fait recherchée.

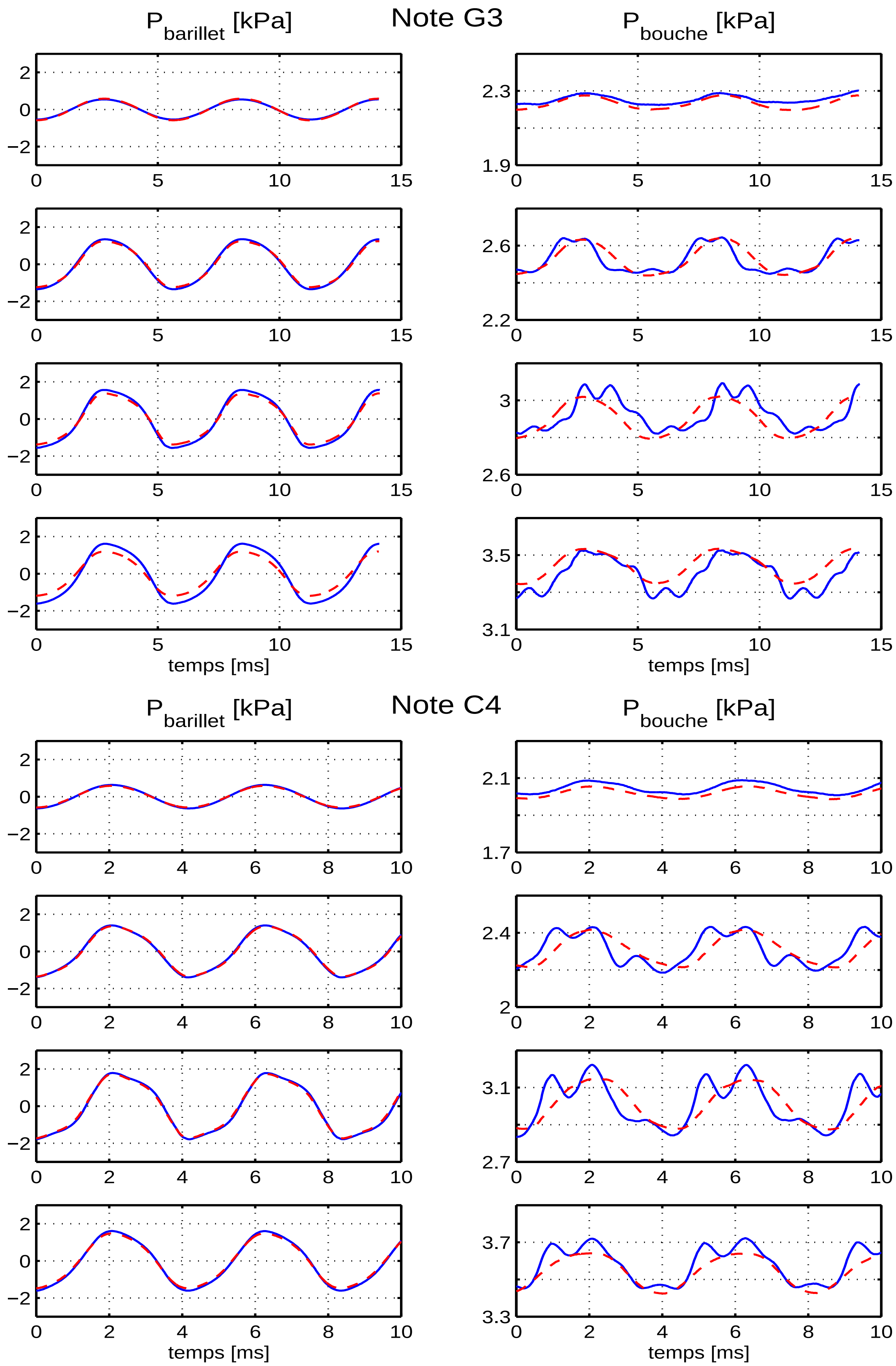


Fig. 4.20 – Pressions dans le barillet et dans la bouche. La pression statique P_{m0} vaut de haut en bas : pour la note G3, 2.22, 2.50, 2.90 et 3.40 kPa ; pour la note C4, 2.00, 2.30, 3.00 et 3.55 kPa. Configurations “ee” en trait plein bleu et “aw” large en pointillés rouges.

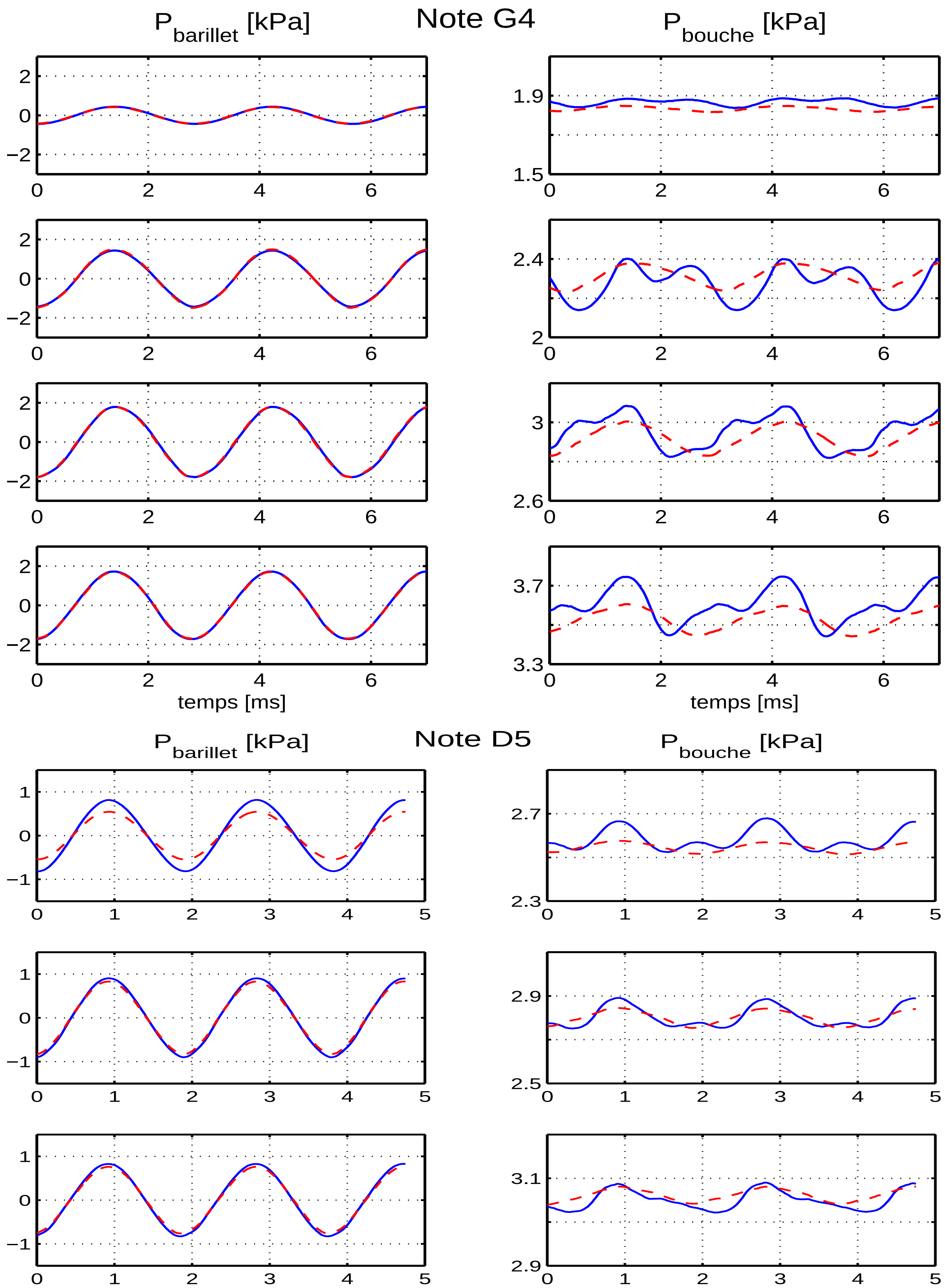


FIG. 4.21 – Pressions dans le barillet et dans la bouche. La pression statique P_{m0} vaut de haut en bas : pour la note G4, 1.80, 2.30, 2.90 et 3.50 kPa ; pour la note D5, 2.52, 2.80 et 3.20 kPa. Configurations "ee" en trait plein bleu et "aw" large en pointillés rouges.

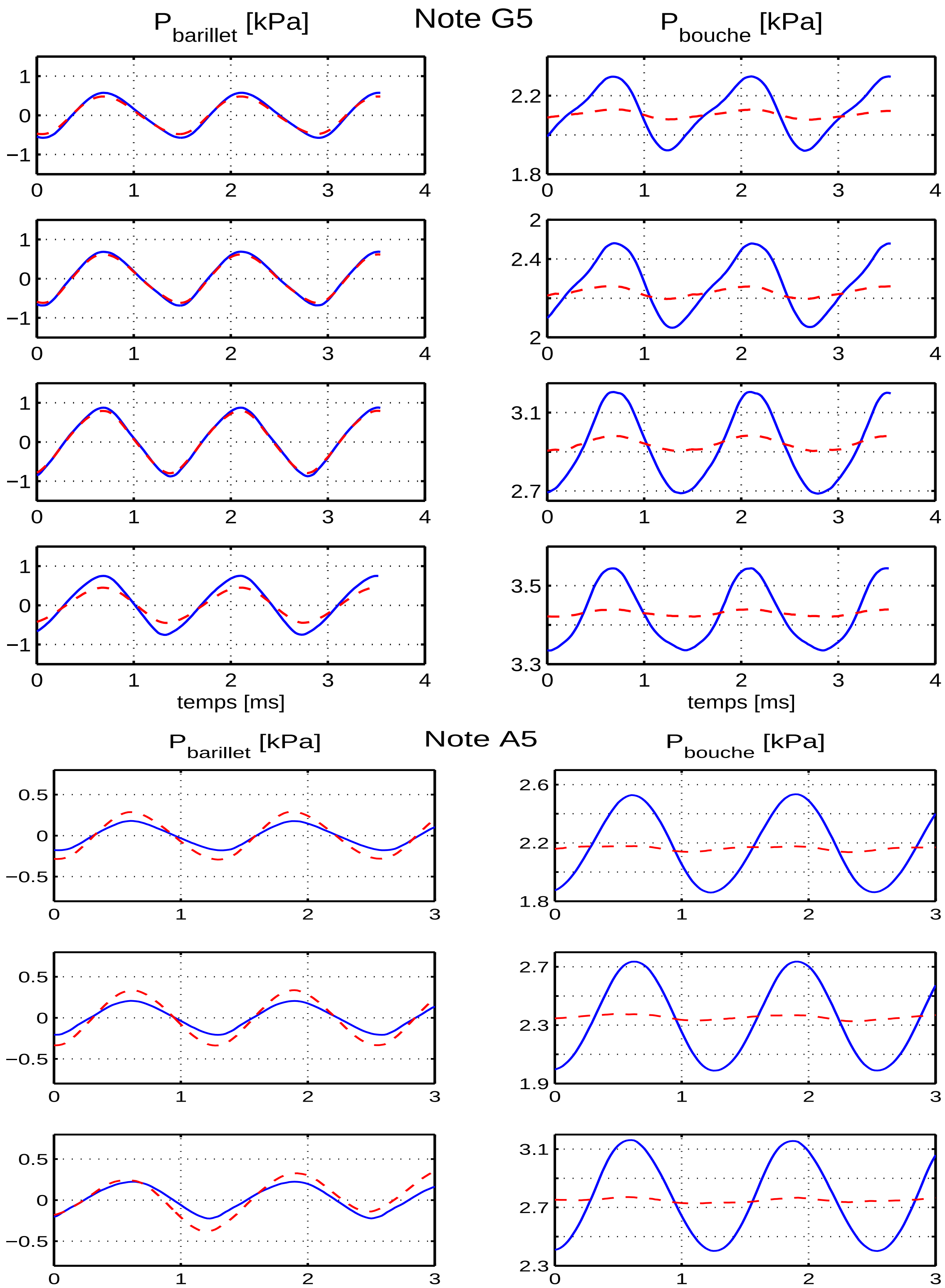


Fig. 4.22 – Pressions dans le barillet et dans la bouche. La pression statique P_{m0} vaut de haut en bas : pour la note G5, 2.06, 2.25, 2.90 et 3.50 kPa ; pour la note A5, 2.1, 2.3 et 2.7 kPa. Configurations "ee" en trait plein bleu et "aw" large en pointillés rouges.

Pour les formes d'ondes dans le barillet, peu de différence peut-être relevée entre les deux configurations, mise à part de temps à autre une amplitude un peu plus faible pour la configuration "aw" près des seuils d'oscillation et d'extinction, et une amplitude toujours plus faible pour le "ee" pour la note A5. Cependant, l'allure temporelle des signaux sur quelques périodes ne permet pas de déceler des variations spectrales fines et il est donc nécessaire de passer maintenant à une étude des spectres.

Nous avons sélectionné dans les figures 4.23 et 4.24 un panel représentatif de situations différentes dans le barillet. En effet, il ne semble pas y avoir un comportement "universel" d'une configuration sur toutes les notes mais au contraire chaque configuration va affecter différemment le spectre suivant la note jouée, et le comportement pourra ainsi être différent même pour deux notes rapprochées.

Pour la note G3 (obtenue vers 177 Hz), l'amplitude des harmoniques impairs n'est que très peu affectée par le changement de configuration, sauf près du seuil d'extinction. En revanche, les harmoniques pairs, du moins le second et le quatrième peuvent être notablement augmentés pour certaines pressions par la configuration "ee". Le cas de la note D5 ($\sim$ 525 Hz) montre que le changement de configuration peut n'affecter sensiblement, voire de manière très importante aux deux seuils, que l'harmonique 1 en laissant les autres harmoniques quasiment inchangés.

La note G5 ($\sim$ 707 Hz) montre, quant à elle, que le renforcement d'un harmonique peut être spectaculaire au point d'être près de deux fois plus élevé pour le "ee" que pour le "aw" dans le cas de l'harmonique 3 sans que les autres en soient vraiment affectés. Ces effets sont à comparer avec ceux pour la note A5 ($\sim$ 785 Hz), seulement un ton au-dessus : l'augmentation de l'harmonique 3 par la configuration "ee" est deux fois plus marquée mais en plus les autres harmoniques sont également bien différents entre les deux configurations : le cinquième harmonique est deux fois plus grand et le deuxième une fois est demi dans la configuration "ee". D'autre part, l'amplitude du premier harmonique est au contraire diminuée par cette configuration, ce que l'on avait déjà observé sur l'amplitude totale du signal à la figure 4.22. Le fait que la plage de jeu soit bien augmentée avec le "ee" avait déjà été signalé lors de l'étude de la fréquence de jeu. Notez que pour les deux notes G5 et A5, les harmoniques pairs sont très supérieurs aux harmoniques impairs : ils sont deux fois plus grands alors qu'ils sont dix fois plus petits pour la note G3.

L'interprétation de ces phénomènes n'est pas chose aisée puisque, ainsi que nous l'avons déjà vu pour les tuyaux, le renforcement d'un harmonique dans le barillet n'est généralement pas corrélé à un maximum d'impédance du CV au voisinage de cette fréquence. On pourrait supputer que comme le troisième pic (toutefois d'amplitude faible, cf figure 3.3 ou 2.27) du "ee" tombe sur le troisième harmonique de la note A5, à l'origine faible puisqu'il est au-dessus de la fréquence de coupure, cela pourrait stabiliser l'oscillation, mais il faut quand même reconnaître que la différence apportée par ce pic est très faible au niveau de l'impédance totale d'après la figure 3.23. Aucune explication n'est donc vraiment échafaudable juste à partir des impédances totales représentées aux figures 3.23 et 3.24. D'autre part, les simulations numériques ne nous aident en rien puisqu'elles ne prédisent pas les phénomènes observés.

Nous nous retrouvons ainsi un peu impuissants face à ces résultats expérimentaux que nous pouvons observer et commenter sans arriver à les expliquer.

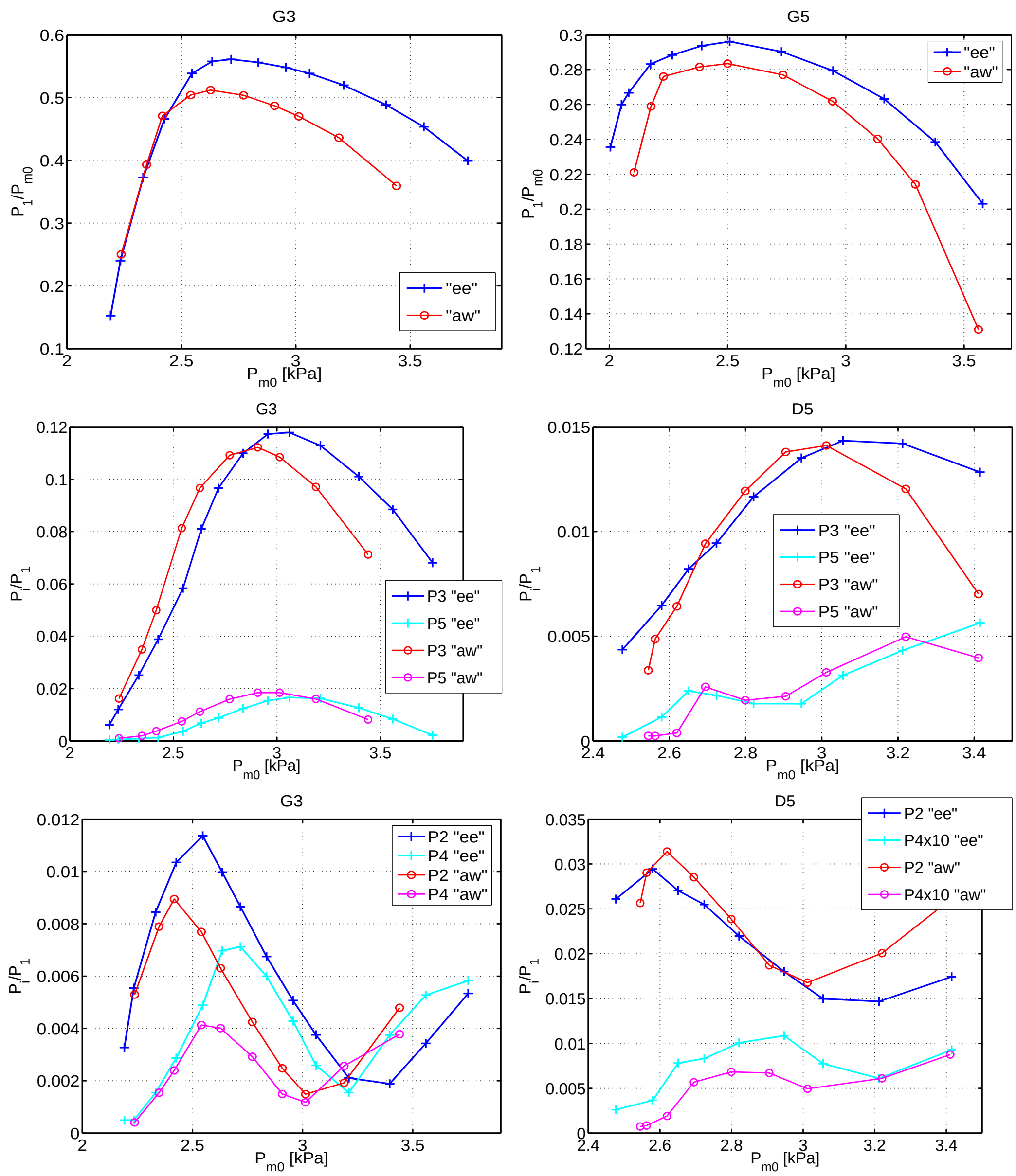


FIG. 4.23 – Evolution des différents harmoniques dans le barillet, en fonction de P_{m0}, pour les deux configurations "ee" et "aw" : note G3 dans la colonne de gauche et note D5 (embouchure "clar-grave") dans la colonne de droite.

4.6.2 Autres études

Dans cette partie, nous étudions tous les phénomènes qu'il s'avère, dans le cadre de cette thèse, hors de question de modéliser et impossible à simuler avec *Harmbal* , mais qui présentent des effets importants pour les clarinettistes et peuvent ouvrir des pistes pour la suite de l'étude.

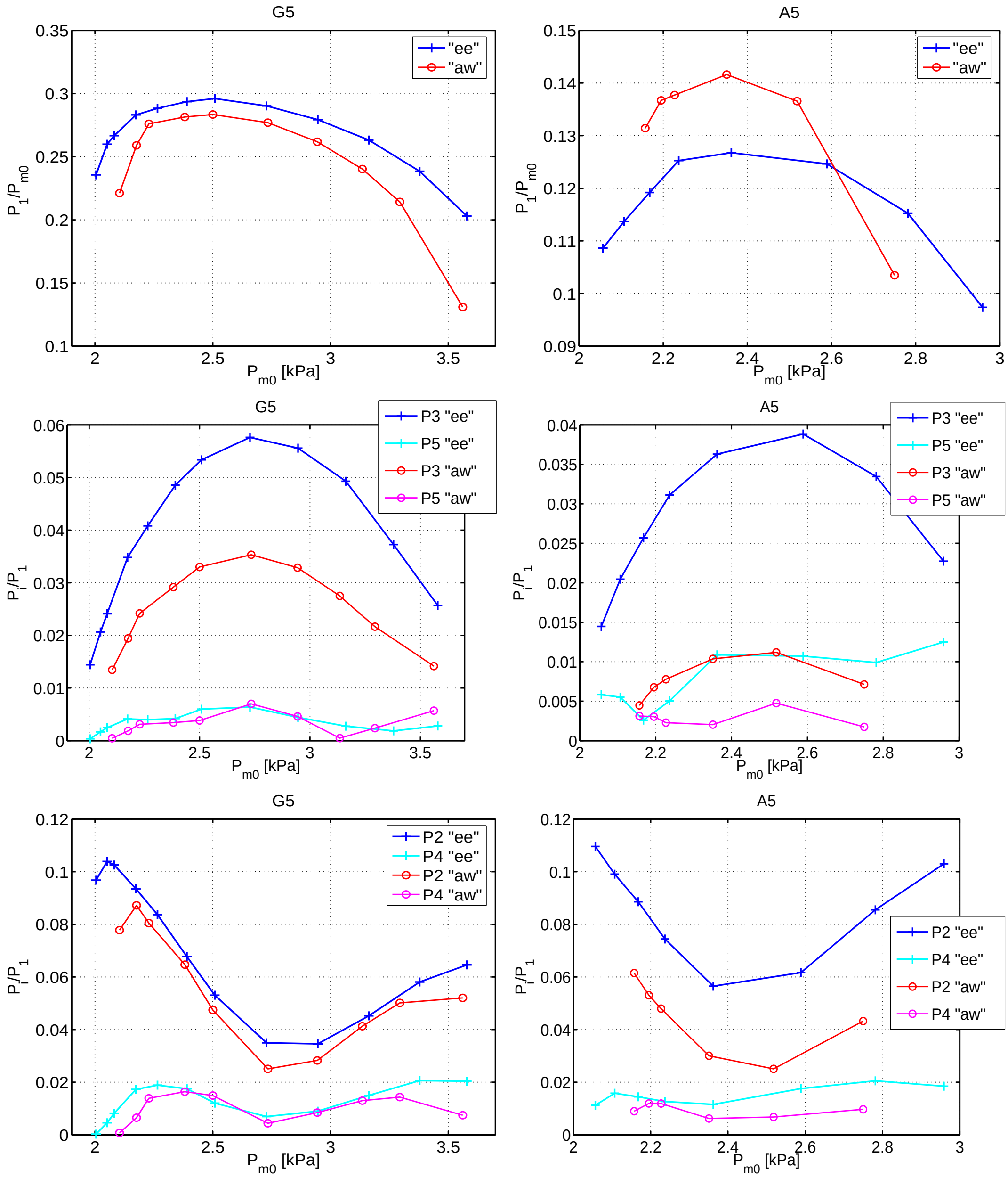


FIG. 4.24 – Evolution des différents harmoniques dans le barillet, en fonction de P_{m0}, pour les deux config "ee" et "aw" : note G5 dans la colonne de gauche et note A5 dans la colonne de droite.

L'émission du suraigu

Nous en avons déjà discuté pour des notes particulières comme le C6 et le E6 mais j'aimerais ajouter des commentaires plus généraux sur l'ensemble des notes de ce registre.

- Le jour où la bouche artificielle a été réglée par P.A. Taillard, nous avons constaté une émission possible sur le mode 5 du B5 au D6 avec la configuration "ee" mais sur une plage de pression réduite alors que l'émission de ces mêmes notes fut obtenue sur une plage de pression

plus grande avec la configuration “aw”. De surcroît les notes Bb5 et Eb6 avec “aw” furent également obtenues. Nous sommes même arrivés au A6 avec le “bocal” (utilisé pour la prise des clichés en raison de sa face arrière plane) ce qui confirme bien la nécessité d’un volume buccal plus grand prôné par Marchi [62].

- Après d’autres expérimentations, j’ai également remarqué que non seulement il fallait ajuster la pression des lèvres pour jouer soit le registre aigu soit le grave, mais qu’en plus, pour un registre donné, cet ajustement dépendait de la configuration. Ainsi pour l’aigu, il faut une pression des lèvres légèrement plus faible dans la configuration “ee” que dans la configuration “aw”. Dans les deux cas, elle est plus faible que celle pour émettre le grave, de sorte que si on l’utilise pour le registre grave, il sort à la douzième avec le “aw” (mais pas avec le “ee”). D’autre part, l’optimisation de la pression des lèvres n’arrive pas à être aussi bien faite pour le “ee” que pour le “aw” dans l’aigu et le suraigu. Cette dernière configuration permet en effet un son plus doux et plus facile à obtenir, ce qui a été confirmé par le clarinettiste Emmanuel Jourdan venu tester la bouche artificielle.

Nature des bruits générés juste avant le seuil d’oscillation

Les résultats présentés à la figure 4.25 pour les notes A5 et G4 montrent qu’on peut entendre dans le bruit, juste avant le seuil, la note qui va sortir, soit approximativement F4 au lieu de A5 pour la configuration “ee” et D6 au lieu de G4 pour la configuration “aw”. Pour A5, cela peut sembler contraire à ce que nous avons vu auparavant aux figures où le “ee” permettait bien l’émission du A5, mais ces mesures de bruit n’ont pas été réalisées le même jour de sorte que l’embouchure n’est pas la même. Ceci montre par ailleurs que l’effet du CV peut être différent suivant l’embouchure utilisée.

Pour le doigté G4 réalisé en configuration“aw”, le pic à la fréquence du D6 est plus faible en amplitude mais beaucoup plus fin que le pic à la fréquence du G4 et de surcroît dans une région où notre oreille est plus sensible, de sorte qu’on l’entend beaucoup plus que la fondamentale, masquée par le bruit de fond. De plus, le pic du G4 est moins grand en amplitude et plus large que celui obtenu pour la configuration “ee”. Ceci n’explique pas l’origine physique de ces phénomènes mais montre que les effets du CV peuvent se faire sentir tout près du seuil, avant même qu’on n’entende vraiment le son de la clarinette. Ceci a également un intérêt pédagogique important puisque l’élève débutant peut apprendre à rectifier sa configuration avant de produire le son.

Cependant, le plus important, pédagogiquement parlant, dans les bruits “pré-son”, est de pouvoir obtenir une image sonore de chaque configuration de CV. Ainsi chacune d’elle conduit à des bruits différents et reconnaissables de sorte qu’ils permettent de caractériser la configuration de CV adoptée. Dans l’annexe H, il est détaillé comment P.A. Taillard, en faisant d’abord reproduire à ses élèves les bruits correspondants aux configurations qui “marchent” pour telle ou telle note, arrive à les faire rapidement jouer des notes difficiles. Il a ainsi observé que le bruit est plus fort pour le “aw” et plus riche en hautes fréquences que le “ee”. Ceci peut être observé sur la courbe de gauche de la figure 4.26, réalisée à partir de l’enregistrement de P.A. Taillard grâce à un microphone cardioïde Neumann, placé à 40 cm devant la clarinette à hauteur du

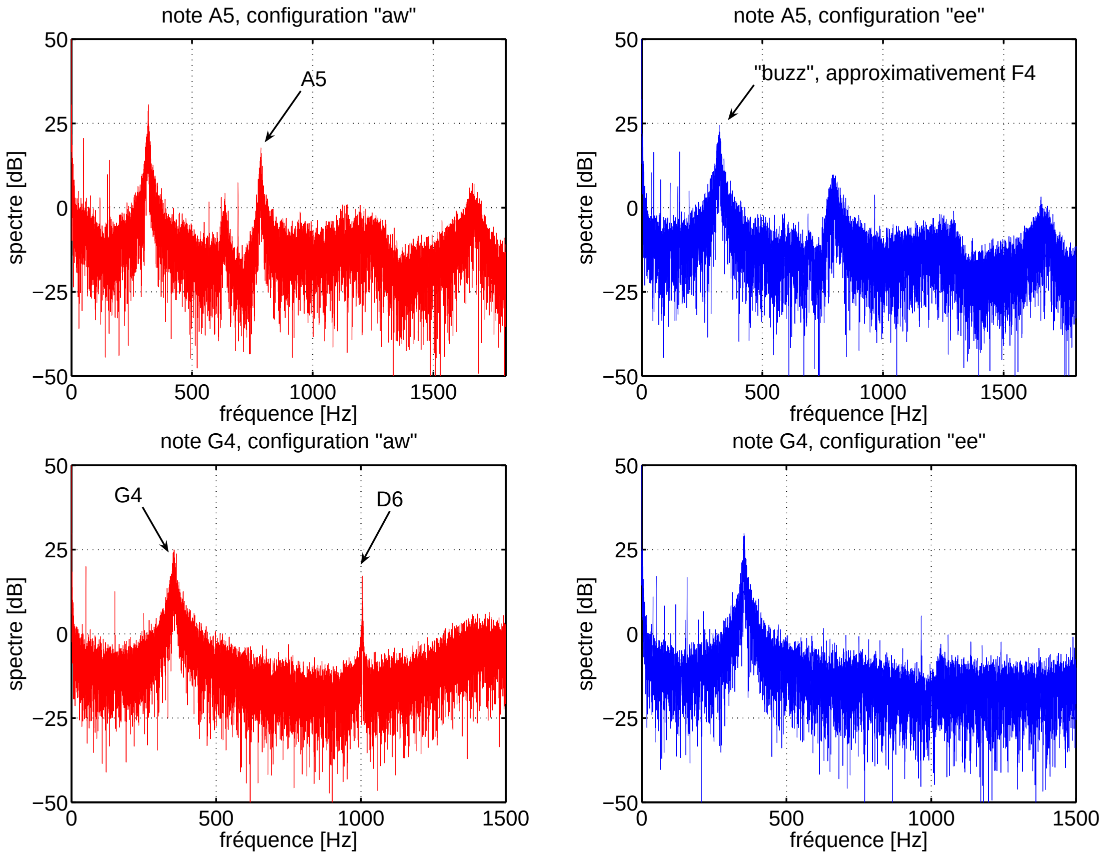


FIG. 4.25 – Spectre du bruit dans le barillet, juste avant le seuil d'oscillation, pour les notes A5 et G4, avec la bouche artificielle : comparaison entre les configurations "aw" à gauche et "ee" à droite.

bec. La configuration "aw" renforce ainsi sgnificativement le bruit généré avant le seuil dans la bande 1000-4000 Hz. Avec la bouche artificielle, rien de tel n'est cependant observé, ni dans le barillet ni à l'extérieur de la clarinette (microphone quart de pouce Brüel & Kjaer placé approximativement comme le microphone Neumann des enregistrements de P.A. Taillard) ainsi que le montre la courbe de droite de la même figure.

Ceci montre que notre CV artificiel, dont tous les disques sont centrés, avec des arrêtes assez vives, et dont la glotte ne peut être modifiée, ne permet pas d'influer autant l'écoulement qu'un vrai CV humain. L'origine du bruit serait donc plutôt à mettre sur le compte de la vitesse de l'air passant sur l'anche ainsi que l'orientation du jet que sur le filtrage du CV, ce qui expliquerait qu'on obtient à peu près toujours le même bruit avec notre dispositif artificiel. Pourtant, ceci ne nous empêche pas d'obtenir à peu près les mêmes effets concernant la facilité d'émission par l'une ou l'autre des configurations qu'un joueur humain : le "ee" permet, dans notre dispositif artificiel, d'obtenir le E6 (à la différence qu'il faut fermer à moitié l'index gauche) mais pas le A5 au seuil (pour une certaine embouchure) alors que le "aw" permet de les obtenir toutes deux, à l'image de ce que montrent les courbes de droite de la figure 4.27. De plus, de ces figures, aucune différence notable entre les courbes de bruit des deux notes A5 et E6 (à gauche dans la figure 4.27) ne permet d'expliquer pourquoi seule la configuration "aw" permet l'émission sur la bonne note dans le cas du A5 alors que les deux configurations

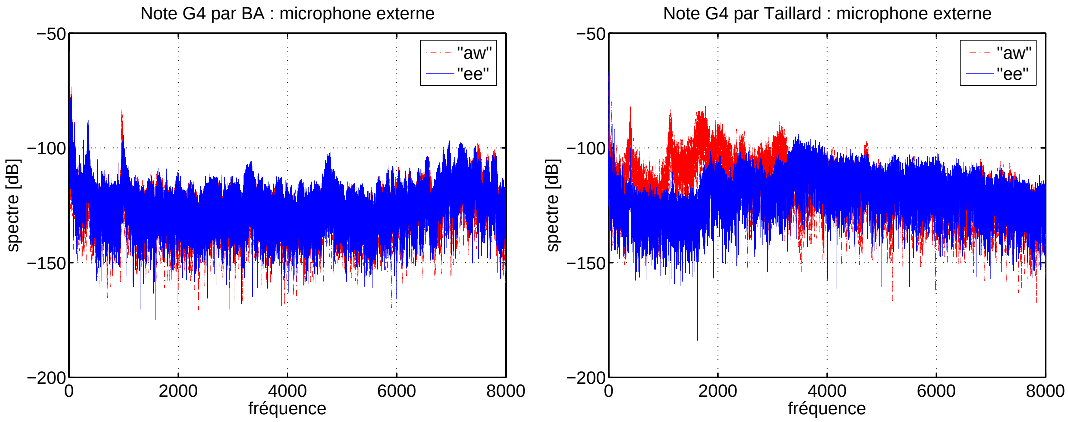


Fig. 4.26 – Spectre du bruit généré avant le seuil et enregistré par un microphone externe, pour la note G4, pour les deux configurations de CV “ee” et “aw” : comparaison entre la bouche artificielle à gauche et le musicien P.A. Taillard à droite.

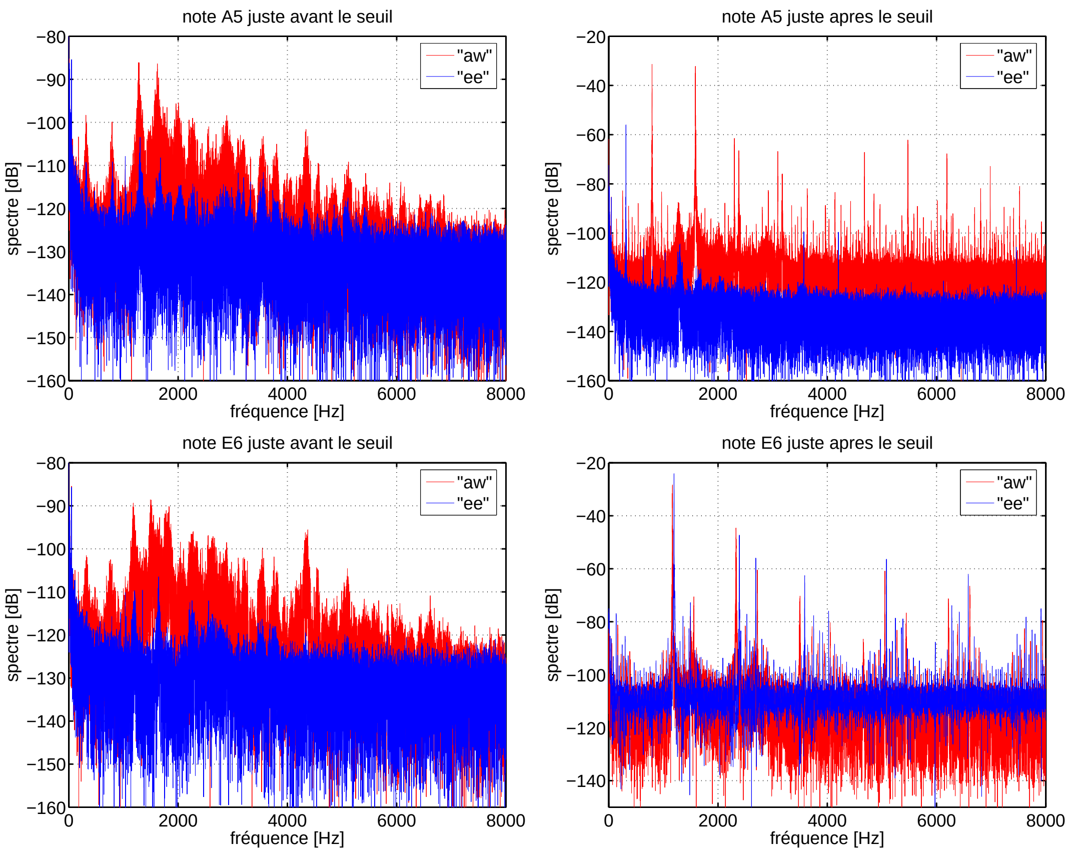


Fig. 4.27 – Spectre du bruit enregistré par P.A. Taillard à 40 cm du bec, juste avant le seuil d’oscillation à gauche et juste après le seuil à droite pour les notes A5 et E6

fonctionnent pour E6. L’hypothèse que le bruit ayant plus d’énergie dans les hautes fréquences, en particulier au niveau des 2nd et 3e harmoniques du A5, permettra de favoriser l’émission du A5 au seuil plutôt que celle du buzz pourrait se concevoir sauf qu’il ne semble pas y avoir

besoin de cette énergie supplémentaire pour E6. Cependant, ceci pourrait en fait s'expliquer en regardant de plus près les spectres d'impédance correspondant à ces deux notes : le pic de résonance correspondant à la fréquence du A5 est de même amplitude voire même légèrement inférieure au pic du buzz alors que dans le cas du E6, le pic associé à cette fréquence est bien le plus élevé de tout le spectre de sorte que l'émission sur une autre note sera moins favorable que dans le cas du A5.

Les liaisons

Nous présentons ici deux liaisons réputées assez difficiles chez les clarinettistes. La première consiste en une octave passant du registre du chalumeau au registre de clairon, par exemple C4-C5. La figure 4.28 montre qu'à la montée, la configuration "ee" permet une transition plus rapide que le "aw", avec un temps de 0.88 s contre 0.94 s. Ce temps a été mesuré entre les instants où l'amplitude du C4 passe en dessous de 0.2 kPa et celle du C5 passe au-dessus de cette même référence. En revanche à la redescente, la configuration "ee" ne permet pas de revenir à C4, contrairement au "aw" et c'est la douzième de C4, soit G5 qui s'installe.

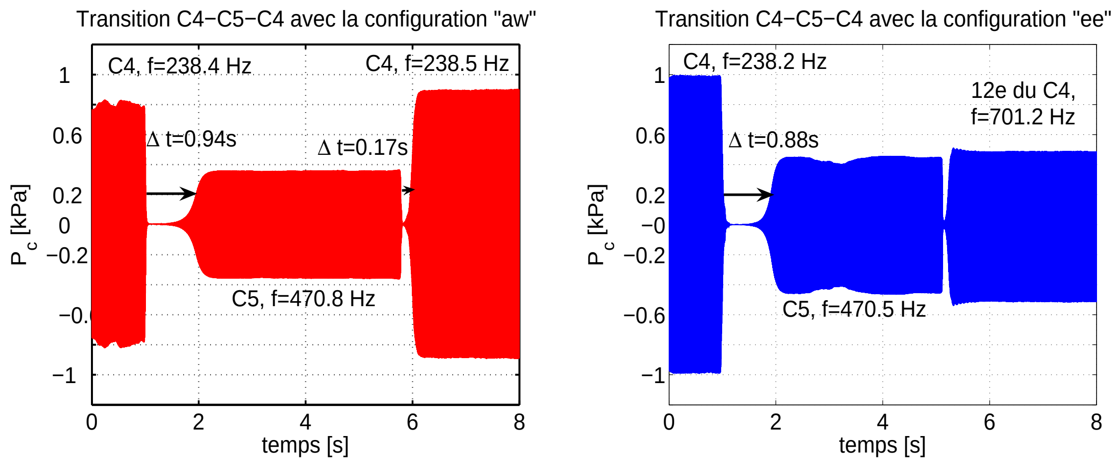


FIG. 4.28 – Liaison C4-C5-C4 pour les deux configurations "aw" et "ee", obtenue avec la bouche artificielle, à une pression de 2.02 kPa.

Cet effet se retrouve sur un certain nombre de liaisons de ce type. Ainsi, dans le cas d'un intervalle de sixte, également difficile à réaliser, par exemple C5-A5, la figure 4.29 nous montre que la configuration "ee" permet d'écourter le transitoire multiphonique à 0.19 s contre 0.44 s pour "aw". De plus, à la redescente (non représentée ici), le "ee" permet cette fois d'émettre la note à sa bonne fréquence mais le transitoire est plus long que pour le "aw" (0.3 s contre 0.05 s).

Ceci est en accord avec les dires d'une grande partie des clarinettistes qui vont adopter dans l'ensemble une configuration en /i/ pour la montée et au contraire une configuration en /æ/ pour la descente, pour la majorité des liaisons de ce type.

Ainsi, les mesures d'impédance réalisées sur les musiciens australiens (dont certaines courbes sont présentées en annexe E) montrent pour la plupart une impédance du type "aw" pour le

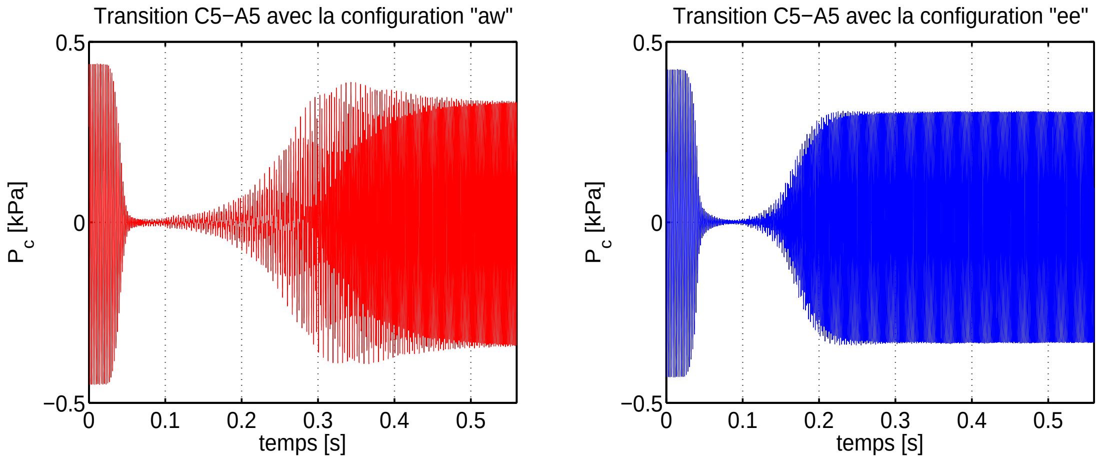


FIG. 4.29 – Liaison C5-A5 pour les deux configurations“aw” et “ee”, obtenue avec la bouche artificielle, à une pression de 2.02 kPa.

pitch bend ainsi que le saut de registre lié, à l’exception de deux musiciens pour lesquels l’impédance présente un pic marqué entre 500 et 700 Hz ce qui serait plus caractéristique d’une configuration de type /i/.

Harmoniques ciblés

A l’image de ce que nous avons vu avec les figures 4.23 et 4.24, les clarinettistes peuvent renforcer un harmonique dans le spectre, grâce, en partie (car un musicien ne pourra que très rarement dissocier les différents effets), à l’utilisation de son CV.

Ainsi, Pierre-André Taillard nous a montré, lors de sa venue, comment il arrive à modifier le contenu harmonique d’une note, sur l’exemple de la note G3, jouée sur la clarinette du laboratoire. Le résultat était flagrant à l’oreille, mais est malheureusement un peu moins convaincant au vu des enregistrements. La partie gauche de la figure 4.30 permet toutefois de voir que certains harmoniques peuvent s’inverser, comme par exemple le 4ième et le 5ième, dans le spectre interne, au niveau du barillet.

Par ailleurs, les clarinettistes peuvent aussi décider de ne jouer qu’un seul des harmoniques. L’autre partie de cette figure correspond ainsi à une descente harmonique qu’il a réalisée chez lui, sur sa clarinette, et enregistrée avec un microphone cardioïde à l’extérieur, à hauteur du bec. Dans ce cas, il utilise une configuration “glissando” (cf annexe H) et “envoie” énormément d’air. Il a ainsi pu passer du 10è harmonique au fondamental, en les jouant tous excepté le 2ième. En ce qui concerne les harmoniques les plus élevés, il n’y a rien de très étonnant : les fréquences sont tellement proches logarithmiquement qu’un léger changement de pression de la lèvre sur l’anche suffira à modifier la fréquence. En revanche, une oscillation sur le quatrième harmonique est nettement plus impressionnante, et ne peut qu’être réalisée avec l’aide du CV. Seuls les cinq premiers harmoniques (excepté le deux) sont représentés sur ce spectre.

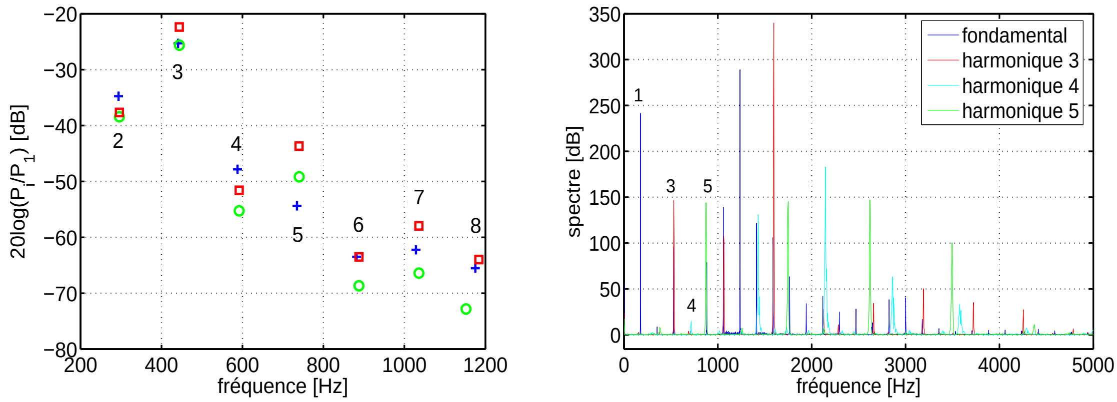


FIG. 4.30 – A gauche : rapport des harmoniques pour trois sons effectués par P.A. Taillard sur la note G3, en modifiant son CV (Enregistrements réalisés dans le barillet). A droite : spectre obtenu lorsqu'il sélectionne comme fondamentale une des fréquences harmoniques de la note G3, sur le doigté de cette note (Enregistrements réalisés à l'extérieur, à hauteur du bec).

4.6.3 Comparaison avec des mesures antérieures

Avant le réglage de la bouche artificielle par P.A. Taillard, une série de mesures avait été réalisée sur la bouche artificielle, qui, bien sûr, jouait à cette époque beaucoup moins bien. Ainsi elle ne montait pas plus haut que le G5, c'était donc une vraie débutante ! Ceci n'a cependant pas empêché que les mesures aient été menées rigoureusement et puissent être exploitées. Elles n'ont d'ailleurs pas été présentées comme les mesures principales de ce chapitre pour une toute autre raison : en rédigeant le chapitre 2, je me suis rendue compte d'une erreur de construction des disques à placer dans la bouche. Leurs sections étaient ainsi beaucoup trop grandes, ce qui avait l'inconvénient de diminuer fortement l'impédance du CV et donc a priori les effets que l'on pourrait observer. Ne voulant pas me voir reprocher de ne pas m'être placée dans des conditions extrêmes alors que nous cherchions une aiguille dans une botte de foin, j'ai donc décidé, à trois semaines de la fin, de refaire toutes les expériences avec les configurations "ee" et "aw" présentées précédemment, ainsi que des expériences supplémentaire rendues possibles grâce au réglage de P.A. Taillard. Et la découverte des nouveaux résultats, en comparaison des anciens, s'est avérée plus que surprenante ! Mais avant de vous les présenter, laissez moi attiser votre curiosité en vous détaillant tout d'abord les configurations de CV avec lesquelles nous avon travaillé ainsi que les conditions d'embouchure.

L'ouverture de l'anche au repos valait $H = 0.37 \pm 0.02$ mm et la pression de placage $P_M = 5.61 \pm 0.1$, ce qui donnait une valeur de ζ de 0.22 ± 0.03.

Par ailleurs, les fonctions d'aire des configurations de CV utilisées pour la bouche artificielle sont données à la figure 4.31.

Les impédances correspondantes à ces anciennes fonctions d'aire sont représentées à la figure 4.32, et celles des "nouvelles" ont été remises à côté pour comparaison.

Il est important de relever que l'impédance du "ee" est bien supérieure à celle du /i/ et

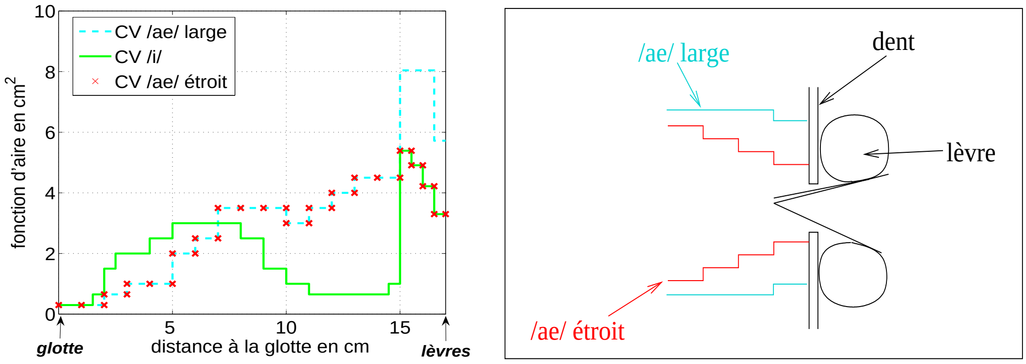


Fig. 4.31 – A gauche : fonction d'aire pour les configurations de conduit vocal /i/, /æ/ large et /æ/ étroit. A droite, détail de l'embouchure pour les configurations /ae/ large et étroit.

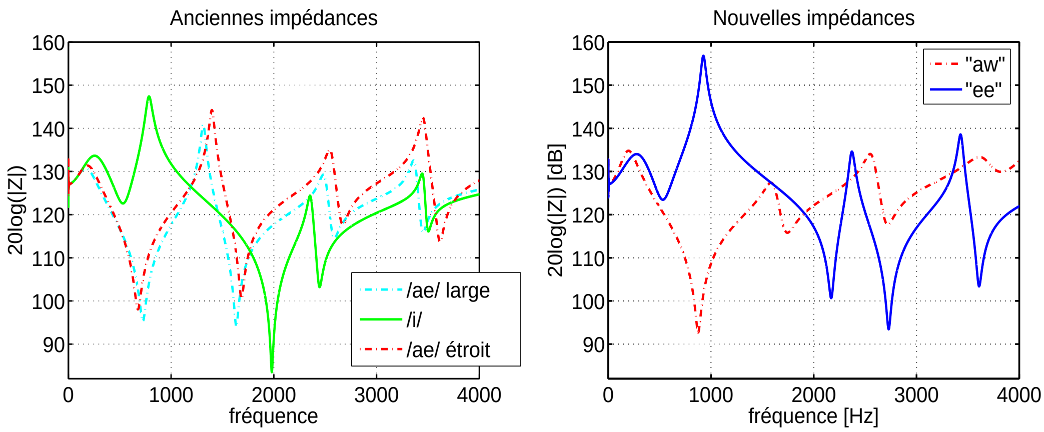


Fig. 4.32 – Comparaison entre le module des impédances des configurations de conduit vocal /i/, /æ/ large et /æ/ étroit à gauche et celles des configurations "ee" et "aw" à droite.

qu'inversement, l'impédance du "aw" est globalement inférieure à celle du /æ/, large comme étroit. De plus, la différence entre les impédances des deux configurations /æ/ est très faible.

Nous nous attendrions donc à avoir encore moins d'effet entre les configurations /i/ et /æ/ que celui obtenu entre "ee" et "aw" et une quasi similarité entre les courbes du CV /æ/ large et celle du CV /æ/ étroit. La réponse est donnée page suivante ...

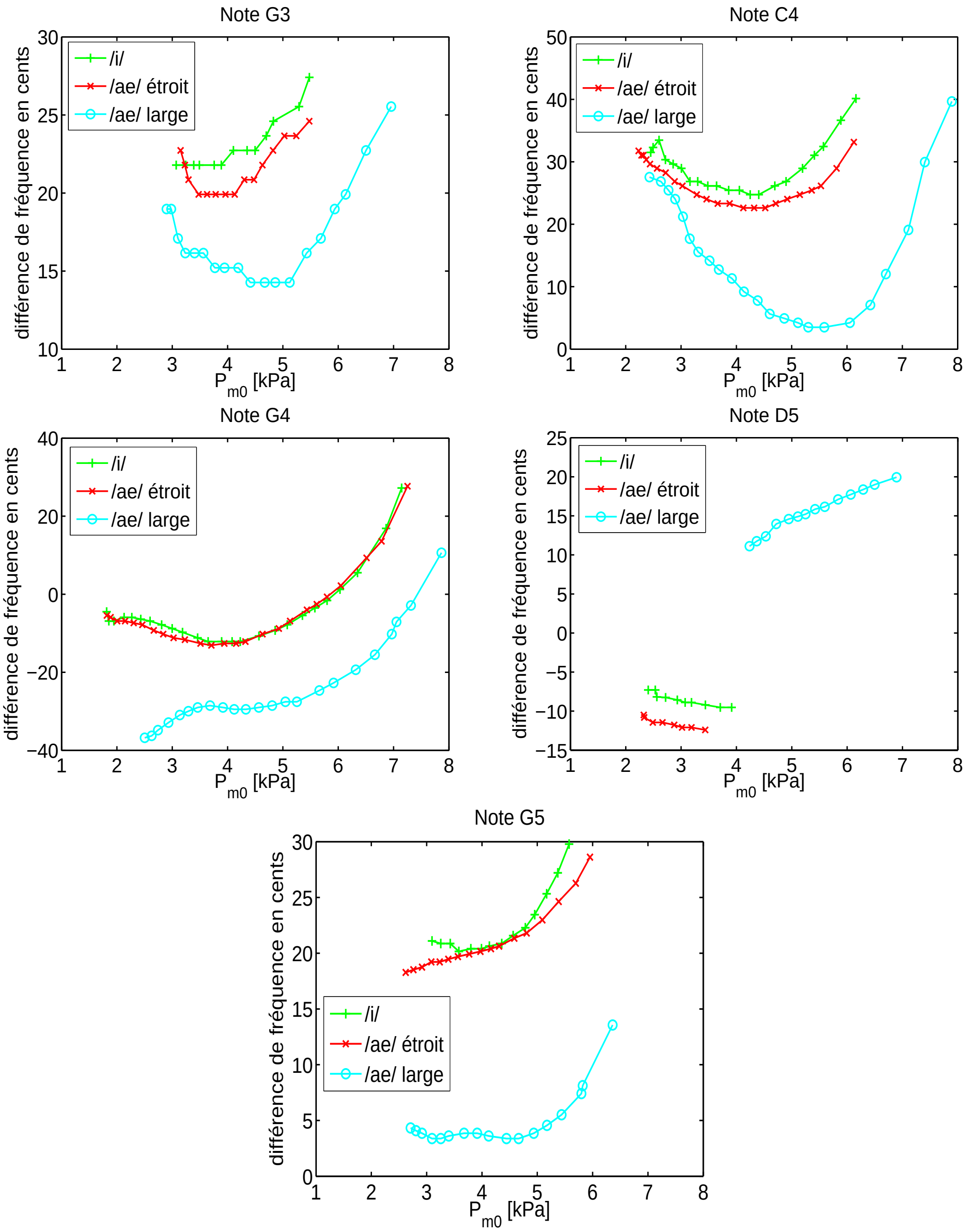


FIG. 4.33 – Différence en cents entre la fréquence de jeu et la fréquence de référence de la gamme tempérée (G3 à 175Hz, C4 à 233Hz, G4 à 349Hz, D5 à 523Hz et G5 à 698Hz), en fonction de la pression statique dans la bouche P_{m0}

Ce n'est donc pas du tout le cas ! Ainsi, les courbes pour le CV /æ/ étroit se superposent quasiment avec celles du /i/ et sont par contre très différentes de celles du /æ/ large : les effets dus à un changement de configuration du /i/ ou /ae/ étroit au /æ/ large sont ici bien plus que perceptibles. D'autre part, les courbes du /i/ et du /æ/ étroit ressemblent fortement à celles que nous avons obtenues pour les configurations “ee” et “aw”.

De plus, nous retrouvons ici la conviction des clarinettistes qu'une configuration avec une large cavité buccale fait baisser la fréquence par rapport à une configuration avec une constric-

tion palatale importante, indépendamment des mouvements de mâchoire induits, qui cependant, s'additionnent. Ces mesures confirment également l'impression de P.A. Taillard de devoir faire un /i/ pour le pianissimo au seuil d'extinction car une explication simple réside dans le fait que le /i/ abaisse ce seuil à des pressions plus raisonnables.

4.7 Conclusion

Cette étude expérimentale a mis en lumière plusieurs points. Le premier est de toute évidence une inadéquation entre notre modèle et l'expérience pour différentes raisons. D'une part les prédictions de *Harmbal* tant sur le plan de la fréquence de jeu que sur le contenu spectral ne sont quasiment jamais vérifiées. D'autre part, notre modèle ne prévoit pas, pour une configuration de CV donnée, des changements radicaux de comportement (comme la soudaine impossibilité d'émission de certaines notes) lorsque l'embouchure varie très légèrement. Enfin, dans notre modèle, l'influence du CV ne dépend uniquement que de son impédance et ne permet donc pas de prédire une radicale différence si les impédances sont quasiment identiques, à l'image de celle observée entre les configurations /æ/ large et étroite à la partie 4.6.3.

Par ailleurs, ces mesures ont mis en lumière l'importante variation du signal de pression dans la bouche d'une configuration de CV à une autre, ainsi qu'en fonction de la note jouée, variation qui, quant à elle, est entièrement corrélée à l'impédance du CV. Il n'est en revanche toujours pas clair comment ce signal va interagir avec celui dans le barillet. C'est sur ce seul point que théorie et expérience se rejoignent : dans les deux cas il est impossible d'expliquer un quelconque effet d'une configuration de CV sur le spectre harmonique dans la clarinette à partir de la connaissance de l'impédance du CV ou, ce qui revient au même, de la connaissance du spectre harmonique dans la bouche.

Les études en parallèle du spectre et de la fréquence de jeu ont également montré que les deux n'étaient pas forcément affectés de la même manière : ainsi, alors que les configurations "ee" et "aw" induisent un effet sur la fréquence quasiment nul, en tout cas, plutôt inaudible dans l'ensemble, les effet sur le spectre peuvent être très importants puisque l'on a vu l'amplitude de certains harmoniques parfois multipliée par deux d'une configuration à l'autre. D'autres paramètres sont également modifiés notablement par le CV, comme la possibilité et la pureté d'émission d'une note ou bien la qualité des liaisons délicates.

Enfin, le dernier point, et certainement le plus important, est que l'influence du CV ne peut se résumer à sa seule composante acoustique. En particulier, l'effet flagrant sur la fréquence de jeu observé au paragraphe 4.5. ne peut s'expliquer uniquement par la différence importante de volume buccal entre les deux configurations /æ/ étroite et large, puisque par ailleurs les impédances sont quasi identiques (et le reste de la géométrie aussi). Par ailleurs, les mesures d'impédances du CV des musiciens renforcent cette conclusion que les effets ne peuvent être purement acoustiques : la figure E.5 montre par exemple une grande similitude entre deux configurations conduisant pourtant, d'après la clarinettiste, à des sons de qualités opposées.

Dans le cas de notre expérience du 4.5, la modification importante du volume buccal a nécessairement une influence sur l'aérodynamique du jet ou du flux d'air qui arrive sur l'anche et c'est donc certainement un effet aérodynamique, et non acoustique, qui serait responsable de la différence conséquente observée sur la fréquence de jeu entre les deux configurations.

Conclusions et perspectives

A travers les différentes études, théoriques mais surtout expérimentales, de cette thèse, nous avons cherché à acquérir une meilleure connaissance du système auto-oscillant de type clarinette lorsqu'en plus du résonateur principal que constitue le corps de la clarinette, un autre résonateur, directement lié au musicien, que représente son conduit respiratoire, est pris en compte. Nous avons en particulier cherché quelles sont les différences introduites par la prise en considération du conduit vocal dans les solutions obtenues, en ce qui concerne la fréquence de jeu, le spectre et la plage de jeu, afin de mieux comprendre comment et dans quel but le musicien utilise son conduit vocal. Nous n'avons considéré dans cette thèse que les effets engendrés uniquement par un changement de géométrie (et donc d'impédance) du conduit vocal, plus subtils que les effets, largement prépondérants, des mouvements induits de mâchoire qui modifient fortement l'embouchure. Il faut donc garder à l'esprit que les effets étudiés ici sont en réalité couplés avec d'autres effets chez les musiciens et que c'est la combinaison totale de tous les effets causés par un changement de configuration du conduit vocal qui peut permettre le très célèbre glissando de *Rhapsody in Blue* de Gershwin.

L'un des premiers objectifs fut la connaissance des propriétés acoustiques du conduit respiratoire des musiciens lorsqu'ils jouent. C'est à cet effet qu'un dispositif de mesure de l'impédance d'entrée complexe du conduit respiratoire a été mis en place. La mesure n'est pas complètement réalisée en situation de jeu puisque les musiciens peuvent souffler mais non jouer, mais en raison de leur "mémoire musculaire" développée, cela est suffisant pour assurer une bonne reproductibilité. Ces mesures ont permis en particulier de constater une énorme variabilité au sein des musiciens, pourtant tous unanimes sur l'importance de leur conduit vocal dans le jeu. Ceci prouve d'une part qu'il n'y a pas en général d'accord du conduit vocal sur la note jouée, comme le pensaient Jonhston *et coll.* [54, 53], et d'autre part qu'il ne semble pas y avoir de "règle en or" concernant la configuration de conduit vocal à adopter. Par ailleurs, cette variabilité s'accompagne de ressemblances qualitatives : ainsi il s'avère que la quasi totalité des musiciens ne varient que très peu la configuration de leur conduit vocal sur l'ensemble du registre en mode de jeu normal, à l'exception du suraigu pour certains. En revanche, la majorité d'entre eux modifient radicalement la configuration pour des conditions de jeu particulière comme la réalisation de liaisons délicates ou un glissando. Ces mesures ont par ailleurs permis de comparer les amplitudes de l'impédance du conduit vocal par rapport à celle de la clarinette : d'une part la première n'est pas nécessairement négligeable au niveau des pics de la seconde - ce qui est en accord avec les clichés de Mukai [71] montrant une ouverture glottique réduite - et d'autre part elle peut être largement supérieure au niveau des creux.

Suite à ces mesures, nous avions en main les données nécessaires pour étudier théoriquement l'influence du conduit vocal dans le cas du modèle élémentaire où la pression dans la bouche n'est plus supposée constante. Ceci se traduit en particulier par la mise en série des impédances des deux résonateurs par rapport à la différence de pression de part et d'autre de l'anche. Cette étude a mis en lumière différents points. Tout d'abord, il n'y a pas de configuration de CV que l'on pourrait qualifier de neutre en raison de la particularité de la clarinette de présenter des minima d'impédance au niveau des harmoniques pairs. Pour ceux-ci, l'impédance du CV est nécessairement prépondérante, même si elle est d'amplitude moyenne bien plus faible que celle de la clarinette, et peut ainsi influer sur la fréquence de jeu comme sur le spectre. Par ailleurs, l'influence des harmoniques supérieurs dans le son résultant rendent le problème d'une extrême complexité de sorte que les résultats numériques obtenus avec le programme d'équilibrage harmonique *Harmbal* sont très difficilement interprétables intuitivement à la lumière des courbes d'impédance totale. Enfin, alors que le spectre harmonique de la pression dans la bouche est le reflet de l'impédance du CV (par exemple le troisième harmonique sera élevé s'il tombe sur une résonance du CV), aucune corrélation de ce type n'a été trouvée pour le spectre de pression au niveau du bec. Ceci n'implique cependant pas que le CV ne peut modifier le contenu harmonique de la pression dans le bec mais signifie juste qu'à l'heure actuelle, nous ne pouvons ni expliquer ni prévoir l'effet qu'aura telle ou telle configuration sur le spectre autrement que par simulation numérique.

Dans la mesure où notre modèle élémentaire ne prend pas en compte de nombreux paramètres et que les musiciens sont difficilement reproductibles et surtout ne peuvent modifier la configuration de leur conduit vocal sans modifier la pince de l'anche, nous avons voulu mettre en évidence expérimentalement, avec une bouche artificielle, l'influence d'un changement de géométrie du CV. Une bouche artificielle a donc été conçue et fabriquée de sorte à pouvoir y inclure un conduit vocal artificiel. Il est ainsi aisé de changer la configuration sans modifier aucunement la pression des lèvres ou le positionnement de la clarinette.

En ce qui concerne le spectre harmonique de la pression dans le barillet, nous avons pu observer qu'un changement de configuration peut entraîner des différences importantes, pas en accord avec la théorie mais tout de même similaires quant au fait que nous ne sommes pas non plus arrivés à les expliquer par des raisonnements simples. Ceci explique en particulier la possibilité pour les musiciens de cibler ou renforcer certains harmoniques dans le son.

A propos de la comparaison entre les expériences et la théorie, qui, il est important de le rappeler, n'est valable que dans le domaine anche non battante, soit dans un domaine très restreint de pressions, nous avons retrouvé des résultats analogues à ceux d'Ollivier [74], qui mettent en évidence la surestimation de ces harmoniques par le modèle théorique. Nos mesures mettent cependant encore plus en cause le modèle lorsque le conduit vocal est pris en compte puisque les simulations numériques peuvent prédire des effets opposés à ceux obtenus expérimentalement. En ce qui concerne la fréquence de jeu, nous obtenons des résultats très différents des courbes expérimentales d'Ollivier, et très différentes également des simulations numériques. Il serait donc intéressant de reprendre les expériences d'Ollivier à la lumière de cette étude.

Nous avons observé par ailleurs que l'émission dans la fin de l'aigu et le suraigu semble très sujette à la configuration de CV puisque dans certains cas, seule une des deux configurations permettait l'émission. En règle générale une configuration de type /æ/ avec une large cavité

buccale est préférable à une configuration de type /i/ pour les notes aiguës, en accord avec une partie des clarinettistes. L'effet de la configuration sur l'émission s'est également fait ressentir lors de transitions de sixte ou d'octave dans deux registres différents : nous avons également retrouvé l'impression d'un certains nombre de clarinettistes, à savoir que pour la montée, la configuration /i/ est préférable car raccourcit les temps de transition alors que /æ/ semble plus adaptée pour la descente, permettant plus facilement le saut de registre.

L'étude s'est également révélée très surprenante : en ce qui concerne la fréquence de jeu, deux configurations d'impédances quasi identiques peuvent conduire à une différence de plus d'une dizaine de cents alors que deux configurations d'impédances très différentes la modifient de moins de quelques cents (sauf dans l'aigu).

L'étude expérimentale n'a donc pas clos le sujet. Des investigations complémentaires mériteraient d'être menées, tant sur le plan purement acoustique que dans des directions nouvelles. Une piste à explorer est l'influence aérodynamique de la cavité buccale, en particulier du volume disponible dans la bouche autour du bec, sur la circulation de l'air au voisinage de l'anche. Nous avons ainsi évalué, de manière très approximative, par ordre de grandeur, la différence de fréquence entre un cas où la vena contracta à l'entrée du canal de l'anche en viendrait à disparaître grâce à un guidage du flux d'air par la langue dans une position de type /i/ et un cas où elle serait maximale dans une configuration de type /æ/. La différence est de trois cents soit faible mais il est évident que c'est une vision grossière d'un des phénomènes aérodynamiques pouvant intervenir. Il faudrait également voir comment un volume buccal réaliste influe sur la raideur de l'anche. Ainsi, nos expériences ont montré qu'une cavité buccale étroite réduit de manière non négligeable la pression d'extinction comme si l'anche devenait plus souple que pour une configuration de volume buccal plus large. Les mesures d'Ollivier [74] aboutissant à une raideur approximativement constante devraient donc être refaites avec une cavité buccale restreinte et une arrivée d'air mobile pour tester simultanément l'influence de la circulation de l'air au voisinage du bout de l'anche.

Je voudrais profiter également de cette conclusion générale pour mettre en valeur l'intérêt, pour nous autres acousticiens, de travailler en étroite collaboration avec des musiciens. Il s'agit plus que d'une simple écoute de leurs problèmes ou souhaits : il faut vraiment arriver à nous immerger dans leurs préoccupations pour en identifier les origines physiques et à en discuter au fur et à mesure de l'avancement des recherches afin de vérifier régulièrement, de part et d'autre, la pertinence des question posées. Ainsi, Deborah de Graaff et Pierre-André Taillard ont contribué notablement à l'avancement de cette thèse par leur regard externe, approfondi et questionneur sur les expériences à mener en fonction de leur expérience personnelle et pédagogique et surtout de leur questionnement permanent pour mieux comprendre ce qu'ils font (et donc mieux l'enseigner), améliorer sans cesse leur palette de jeux et repousser les limites de la clarinette. C'est dans cette optique que j'ai mis la réflexion de Taillard dans l'annexe H : en plus de faire le point sur les conséquences pédagogiques résultant de ce travail et des nombreuses discussions que nous avons eues, elle offre l'interprétation d'un clarinettiste sur l'influence aérodynamique du conduit vocal. Elle est donc à lire en tant que telle et bien qu'elle puisse présenter des interprétations qui restent à être étayées scientifiquement, elle offre indéniablement des pistes pour la suite de cette étude qu'il ne faudra pas négliger si l'on veut pouvoir résoudre le problème dans l'idée d'apporter une contribution utile à la communauté des musiciens et non pas uniquement par pur plaisir scientifique.

Annexe A

Liste des symboles

Voici la notation des différentes grandeurs utilisées dans cette thèse.

Z_c	impédance de la clarinette	Pa.s.m^{-3}
Z_m	impédance du conduit vocal	Pa.s.m^{-3}
$p_c(t)$	pression dans le bec de clarinette	Pa
$p_m(t)$	pression harmonique dans la bouche	Pa
P_{m0}	pression statique dans la bouche	Pa
$u(t)$	débit acoustique dans le canal de l'anche	m^3.s^{-1}
$y(t)$	déplacement de l'anche par rapport à sa position au repos	m
H	ouverture du canal de l'anche au repos	m
P_M	pression de placage statique de l'anche	Pa
γ	pression dans la bouche adimensionnée par P_M	s.d.
ζ	paramètre d'embouchure, lié au débit maximal pouvant passer dans le canal de l'anche	s.d.
ω_r	pulsation de résonance de l'anche	rad.s^{-1}
g_r	coefficient d'amortissement de l'anche	s^{-1}
M, R et K	masse, amortissement et raideur adimensionnés de l'anche	s.d.

Voici la liste de notation des voyelles et phonèmes utilisés avec des exemples de mots anglais qui correspondent

/i/	notation phonétique	heed
/ɪ/	notation phonétique	hid
/æ/	notation phonétique	had
/ɔ/	notation phonétique	had
"ee"	notation utilisée par les clarinettistes pour désigner une configuration en situation de jeu proche, à ce qu'il leur semble, de celle qu'ils auraient pour le son "heed"	
"aw"	notation utilisée par les clarinettistes pour désigner une configuration en situation de jeu proche, à ce qu'il leur semble, de celle qu'ils auraient pour le son "paw"	

Annexe B

Tableau récapitulatif des impédances utilisées

Voici un tableau récapitulant les impédances utilisées pour la clarinette et le conduit vocal dans les différentes parties de cette thèse.

Partie	Clarinette		Conduit vocal
3.6.1	Tuyaux cylindriques ; Impédances simulées utilisant eq. (C.7) et (C.8) :		Impédance simulées (modèle de la partie 2.4)
	$f_c = 355$ Hz	$\eta = 0.013$	
	$f_m = 240$ Hz	$\eta = 0.016$	
	$f_l = 177$ Hz	$\eta = 0.02$	
	$f_{c,amorti} = 355$ Hz	$\eta = 0.02$	
3.6.2	Clarinette ; Impédances mesurées au Mans		Impédances mesurées au Mans
4.5	Impédances mesurées ; Tuyaux cylindriques de diamètre 1.7 cm et de longueurs 10.8, 22.2 et 33.9 cm		Impédances mesurées

Annexe C

Harmbal et l'équilibrage harmonique

C.1 *Harmbal* et la clarinette

Le programme d'équilibrage harmonique utilisé dans cette thèse est celui écrit par Snorre Farner, lors de son post-doctorat au LMA, durant ma première année de thèse. J'ai participé activement à sa mise en place en le testant régulièrement afin de retrouver les résultats déja connus sur la clarinette et en cherchant à comprendre la multitude de solutions obtenues. Ceci a fait l'objet d'un article (cosigné par Snorre Farner et Jean Kergomard), "Some aspects of the harmonic balance method applied to the clarinet", paru dans le numéro 65 d'Applied Acoustics, en 2004.

Résumé (traduit)

La clarinette a été largement étudiée par différentes techniques théoriques et expérimentales. Dans cet article, la méthode de l'équilibrage harmonique (HBM, de l'anglais Harmonic Balance Method) - une méthode numérique fonctionnant principalement dans le domaine fréquentiel - a été appliquée pour résoudre un modèle non-linéaire simple de la clarinette, consistant en un excitateur linéaire (l'anche) couplée non-linéairement à un résonateur linéaire avec des pertes visco-thermiques (le tuyau). Une implémentation récente et améliorée de HBM pour des instruments auto-entretenus nous a permis d'étudier ce modèle théoriquement lorsque la dispersion dans le tuyau ou la masse et l'amortissement de l'anche sont pris en compte. Les solutions périodiques résultantes pour la pression interne et la fréquence de jeu sont en bon accord avec les résultats théoriques obtenus dans des études précédentes. Pour finir, nous présentons et discutons brièvement quelques régimes d'oscillation (certainement instables) obtenus simultanément par HBM et expérimentalement.

C.1.1 Introduction

After the first theoretical attempt to derive the spectrum of reed instruments by Worman [97], improvements have been made to determine the nature of the bifurcation and the spectrum at small oscillations (Grand *et al.* [43]), the influence of the main control parameters on the square signal (Kergomard [57]), and the transition between small oscillations and the square signal (Kergomard *et al.* [59]). A numerical method called the harmonic balance method (HBM) has been adopted and developed by Schumacher [81] and Gilbert *et al.* [42] for self-sustained instruments, and an approximate analytical method called the variable truncation method (VTM) was established by Kergomard *et al.* to obtain analytical results, which were compared with the results of the HBM [59] .

A good reason for employing frequency-domain methods like HBM and VTM is that the solutions found do not depend on the history as they do with time-domain methods. All solutions, stable and unstable, can, in principle, thus be found, which is convenient when studying the influence and control of the different parameters of a given model (cf [31]). As a natural consequence, HBM and VTM are not useful for studies of transients.

An efficient computing tool using the HBM has been developed by Farner (see [31]) enabling us to present solutions not presented earlier. It makes it possible to follow a solution as a parameter changes, for example from small to large oscillations, and thereby easily study the influence of the parameters such as mouth pressure, visco-thermal dissipation in the pipe, and dispersion, as well as the effective stiffness, mass, and damping of the reed.

In the next two sections, we briefly describe a common physical model for the clarinet and the two methods, HBM and VTM, for solving the model equations. Then we study aspects of this model by starting with a simplified version of it and successively adding the effects of dispersion (inharmonicity of the resonator) and the influence of the reed resonance (reed mass and damping) to end up with the described model.

We mainly restrict the study to the first harmonic of the pressure in the mouthpiece and note that exact numerical solutions would be obtained by the HBM if infinitely many harmonics were taken into account.

C.1.2 Model of the clarinet

The clarinet may be modelled as a self-sustained oscillator with a linear exciter (the reed) [91] that is coupled nonlinearly to a linear resonator (the pipe). A common model is described in this section where the simplifications ignore, for instance, recent knowledge on torsional modes of the reed [24, 28, 76] and the interaction between the reed and the mouthpiece lay [74] as well as nonlinear effects in the pipe [21, 41]. Furthermore, any acoustic effects of the player's vocal tract are omitted. Despite its simplicity, this model incorporates many important characteristics of the real clarinet [44, 24]. A sketch of the mouthpiece is shown in Figure C.1 including the meaning of the physical quantities used. Dimensionless quantities are introduced (marked with a tilde in this section only) to generalize the graphs and facilitate the later developments in the

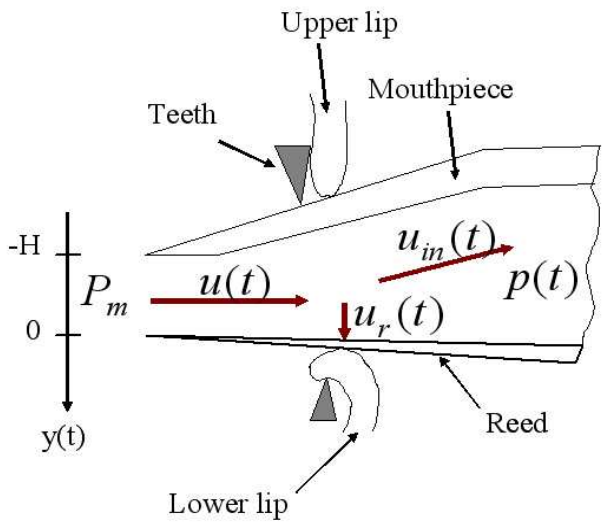


Figure C.1: Schematic view, not to scale, of the clarinet mouthpiece with physical quantities.

VTM.

The reed

The exciter of a clarinet is the reed, which converts energy supplied by the flow of air from the mouth (at elevated pressure p_m, assumed constant) into acoustic energy. Following Wilson and Beavers [95], we treat the reed as a linear spring with mass per unit area μ_r, resonant frequency ω_r, and specific damping g_r. Its displacement y from the equilibrium position is then related to the pressure p in the mouthpiece by:

$$\ddot{y}(t) + g_r\dot{y}(t) + \omega_r^2 y(t) = \frac{1}{\mu_r}(p(t) - p_m), \tag{C.1}$$

where the dots signify time derivatives. The bore of the instrument is represented by its fundamental resonance with angular frequency ω_p and a series of higher resonances (cf Section C.1.2). The maximum negative value of y is $-H$, at which the reed closes, when the mouth pressure is equal to a certain value P_M. Using a tilde to indicate dimensionless quantities, we write:

$$\begin{array}{rclll} \tilde{y} & = & y/H & \text{reed position} & \\ \tilde{p} & = & p/P_M & \text{acoustic pressure in the mouthpiece} & \text{(C.2)} \\ \tilde{t} & = & t\omega_p & \text{time} & \end{array}$$

We nondimensionalize the acoustic pressure in the mouth, the blowing pressure, in terms of P_M:

$$\gamma = p_m/P_M \tag{C.3}$$

The dimensionless version of equation (C.1) is then:

$$M\ddot{\tilde{y}}(\tilde{t}) + R\dot{\tilde{y}}(\tilde{t}) + K\tilde{y}(\tilde{t}) = \tilde{p}(\tilde{t}) - \gamma, \tag{C.4}$$

where K is the dimensionless stiffness, M the dimensionless mass and R the dimensionless damping [31]. We have $K = 1$ because the reed closes ($y = -H$) when $p_m = P_M$, thus $M = (\omega_p/\omega_r)^2$ and $R = \omega_p g_r/\omega_r^2$.

Note that in this system the player's embouchure may be incorporated to some degree, in that different positions of, and forces applied by, the lips yield different values of M and R.

A simplified description can be made by setting $M = R = 0$:

$$\tilde{y}(\tilde{t}) = \tilde{p}(\tilde{t}) - \gamma. \tag{C.5}$$

This simple spring representation of the reed may be good if the playing frequency is low compared to the reed frequency ($\omega_p \ll \omega_r$) and the harmonics around ω_r so small that they do not interact with the resonance peak of the reed. The resonance frequency of the reed, $\omega_r/2\pi$, is normally above 2000 Hz.

The pipe

The pipe is usually characterized by its input impedance [34], which describes its resonances. We are interested in the oscillation mechanism, and high frequencies are relatively unimportant to our study, so we make some severe approximations. We assume at first that the impedance maxima of the bore are exactly harmonic, and that their relative heights are determined only by visco-thermal losses. In practice, the frequencies of the first few impedance maxima of a real clarinet are in approximately harmonic ratios, while the higher frequency peaks are successively further from harmonic [96]. Some of the frequency-dependent effects thus neglected here are those due to the shape of the bell, the mouthpiece, the tone holes and the diameter variations along the bore. Other frequency-dependent effects are those of the radiation impedance at the end (incorporated to first order as a length correction) and the wave dispersion (discussed in Section C.1.5).

The oscillation may be regarded as the interaction between the standing wave in the bore (produced by reflections at both ends) and the reed, where the volume velocity wave $u(t)$ interacts with the pressure $p(t)$ in the mouthpiece. In the Fourier domain we write with dimensionless quantities

$$\tilde{P}(\omega) = \tilde{Z}(\omega)\tilde{U}(\omega), \tag{C.6}$$

where the capital letters P and U are used for the Fourier transforms of the time domain quantities p and u. The dimensionless input impedance is given by [59, 34]:

$$\tilde{Z}(\omega) = \frac{Z}{Z_0} = j\tan(kl) \tag{C.7}$$

with

$$kl = \frac{\pi f}{2f_0} + (1-j)\psi\eta\sqrt{\frac{f}{f_0}} \tag{C.8}$$

where $f = \omega/2\pi$ being the frequency, ψ being related to the Prandtl number [57] ($\psi \simeq 1.3$ for common conditions in air), $f_0 = c/4l$, l being the length of the pipe, and η is a dimensionless loss parameter (see [57]).

In equation (C.8), the real part of the last term on the right is the dispersion term due to visco-thermal effects (i.e. frequency depending on the sound velocity), while the imaginary part is due to visco-thermal losses.

If we ignore the dispersion term in addition to the aforesaid approximations, the resonance frequencies are harmonically related, and the input impedance for the nth harmonic can be written with the following simplified formula taking advantage of the fact that η generally is small (typically 0.02 for the clarinet):

$$Z_n = \begin{cases} 1/(\sqrt{n}\psi\eta) & \text{for odd } n \\ \sqrt{n}\psi\eta & \text{for even } n \end{cases} \tag{C.9}$$

The nonlinear coupling

When there is a pressure difference $\tilde{p} - \gamma$ between inside the mouth and inside the mouthpiece, air will flow with a volume flow $\tilde{u} = uZ_0/P_M$, where $Z_0 = \rho c/S$ is the characteristic input impedance of the pipe with air density ρ, sound speed c in air, and cross section S of the pipe. Assuming some hypotheses and in particular that the system is sufficiently stationary for Bernoulli's law to be valid [46], a nonlinear expression with dimensionless quantities [57] can be obtained for the volume flow:

$$\tilde{u}(\tilde{p}, \tilde{y}) = \zeta(1 + \tilde{y})\sqrt{|\gamma - \tilde{p}|}\text{sign}(\gamma - \tilde{p}) \tag{C.10}$$

for $\tilde{y} > -1$, and otherwise 0, signifying in simple terms that the reed bends up and blocks the opening of the mouthpiece for a part of the oscillation period, though the real behavior is slightly different [74]. This last case is more complex so we limit the study to the non-beating reed regimes and stop the curves before the reed starts to beat.

The "embouchure" parameter

$$\zeta = Z_0 w H \sqrt{\frac{2}{\rho P_M}} \tag{C.11}$$

characterizes the mouthpiece and the mouth position of the musician, w being the width of the reed channel. ζ depends on the stiffness of the reed, on the lips' position, and on the ratio between the cross sections of the reed canal and of the pipe. Its value is important especially for attack transients.

Strictly speaking, there is also a contribution to the volume flow from the reed displacement to the volume flow of air (u_r in Figure C.1). This is often included in the impedance of the pipe by a length correction [20], which does not change the harmonicity of the pipe's resonances.

If a simple reed model is used, i.e. equation (C.5), then equation (C.10) simplifies to

$$\tilde{u}(\tilde{p}) = \zeta(1 + \tilde{p} - \gamma)\sqrt{|\gamma - \tilde{p}|}\text{sign}(\gamma - \tilde{p}) \tag{C.12}$$

for $\tilde{p} > \gamma - 1$ and 0 otherwise.

This gives us a set of three equations (C.4), (C.6) and (C.10) to be solved. As noted earlier, only dimensionless quantities will be used in the following, so we omit the tilde. One of our purposes is to calculate the playing frequency, which depends on the first resonance of the pipe and the effective resonance of the reed, so it is convenient to introduce these two constants: $f_p = \omega_p/2\pi$ and $f_r = \omega_r/2\pi$. Note that $f_p = f_0$ if we disregard dispersion.

C.1.3 Solving methods

The harmonic balance method

The nonlinear problem can be solved by means of the harmonic balance method (HBM), which is a numerical method to calculate the steady-state spectrum of periodic solutions of nonlinear oscillating systems. The method can be used on free-oscillating systems [72] and extended to self-sustained musical instruments such as the clarinet [42].

We assume that the Fourier series of the pressure in the mouthpiece may be truncated to N_p harmonics (partials) plus the DC component. Separating real and imaginary parts, we represent the pressure spectrum by $\vec{P}$ with $2N_p{+}2$ real components.

The three model equations (C.4), (C.6), and (C.10) may be formulated by the fixed point representation $\vec{F}(\vec{P}, f)$ where $\vec{P}$ must satisfy

$$\vec{P} = \vec{F}(\vec{P}, f) \tag{C.13}$$

for a playing frequency f, which is unknown since the interaction with the reed and dispersion will cause f to differ from the frequency of the first resonance of the resonator. This gives $2N_p{+}2$ equations and $2N_p{+}3$ unknowns.

A periodic signal is invariant to a shift in the time domain, so the solution can be shifted to make the first harmonic real and thus its imaginary part zero. This reduces the number of unknowns to $2N_p + 2$, and a finite number of solutions of equation (C.13) may then be found by searching for a root of

$$\vec{G}(\vec{P}, f) = \frac{\vec{P} - \vec{F}(\vec{P}, f)}{P_1}, \tag{C.14}$$

i.e. $\vec{G} = 0$, except for the component corresponding to the imaginary part of the first harmonic. The nonzero denominator P_1 prevents the trivial solution $\vec{P} = 0$. From an estimated solution $(\vec{P}^i, f^i)$ we use the Newton-Raphson method, which follows the locally steepest descent direction of $\vec{G}(\vec{P}, f)$ and returns a step $(\Delta\vec{P}, \Delta f)$ to a point $(\vec{P}^{i+1}, f^{i+1})$ normally closer to a solution. Note that the change in the playing frequency is treated directly in the Newton-Raphson step of the method, as detailed by Farner *et al.* [31].

The iteration process may be stabilized by, for example, a backtracking routine [78], which avoids a diverging step caused by a locally unfavorable shape of $\vec{G}$. We expect that a solution

of equation (C.13) would be a periodic solution of our equations (C.4), (C.6), and (C.10) except for the aliasing problem, which is diminished by a sufficiently high sampling rate. It must be noted that the method says nothing about the stability of the solution.

The method is described in detail in ref. [31], which also presents a realization of the HBM for self-sustained musical instruments through a free computer program called *Harmbal* [30]. The program is made to handle more general models composed of a linear exciter and resonator with a nonlinear coupling. This program was used for the present calculations in conjunction with a Perl script (called *hbmap*) for continuation, i.e. using one result to calculate the next when varying a parameter.

The variable truncation method

The variable truncation method (VTM) [59] is an analytical method based on truncation of the Fourier series obtained from the governing equations and separation of the symmetric and antisymmetric harmonics. In the present system, we simplify the nonlinear equation to equation (C.12) by ignoring the mass and damping of the reed, then we expand it to a third-order polynomial in p, which is sufficient for small oscillations, i.e. close to the oscillation threshold:

$$u(p) = u_{00} + Ap + Bp^2 + Cp^3, \tag{C.15}$$

where

$$\begin{aligned} u_{00} &= \zeta(1-\gamma)\sqrt{\gamma}, \qquad & A &= \zeta\frac{3\gamma-1}{2\sqrt{\gamma}}, \\ B &= -\zeta\frac{3\gamma+1}{8\gamma^{3/2}}, \qquad & C &= -\zeta\frac{\gamma+1}{16\gamma^{5/2}}. \end{aligned} \tag{C.16}$$

The internal pressure $p(t)$ is then written as a Fourier series with harmonics P_i like in the HBM, and assumed to contain only odd harmonics ($i = 1, 3, 5, \dots$) with P_1 real. In brief, the volume flow $u(t)$ is decomposed into a symmetric part ($u_s = u_{00} + Bp^2$) and an antisymmetric one ($u_a = Ap + Cp^3$), and u_a is truncated to the Nth harmonic and combined with equation (C.6). This gives a system of $N + 1$ nonlinear, complex equations and equally many unknowns, including the playing frequency f (as for the HBM). However, as shown by Kergomard *et al.* [59], the result when truncating the nth equation to the order n is not bad even for a square signal. The VTM thus takes advantage of the fact that higher harmonics have a weak influence on the lower ones.

Close to the threshold, the signal is almost sinusoidal [43] so it is sufficient to truncate the Fourier series to the first harmonic, in which case the VTM reduces to a classical first-harmonic method. Equation (C.15) thus becomes

$$U_1 = AP_1 + 3CP_1^3, \tag{C.17}$$

and by applying the admittance $Y_1 = 1/Z_1$, equation (C.6) becomes $U_1 = Y_1P_1$ for the first harmonic, thus

$$P_1^2 = \frac{Y_1 - A}{3C}. \tag{C.18}$$

In contrast to the HBM, the first harmonic calculated with the VTM depends only on the degree of expansion, not the number of harmonics. Thus, in the following studies we will only compare the first harmonic of the VTM, even though we consider many harmonics with the HBM.

C.1.4 Simple reed model

Although the HBM is a powerful method, we start with the elementary case of a simple reed model without mass and damping, equation (C.5), and with no dispersion, equation (C.9). This enables us to verify the results with the analytical method VTM. Later on we use the HBM on cases where analytical solutions are difficult to find.

Playing frequency

When dispersion is not taken into account, the resonance frequencies of the pipe are harmonically related. The playing frequency f is thus the same whatever the value of the mouth pressure and however many harmonics are taken into account. From equation (C.18), Y_1 must be real (as P_1 is real), which is satisfied only for f being a resonance frequency of the pipe. Thus for the lowest register, we get $f = f_p = f_0$, where f_0 was defined in equation (C.8).

The oscillation threshold

Near the oscillation threshold, equation (C.12) can be approximated by the third-order expansion (C.15) and solved by the one-harmonic VTM: Equation (C.18) implies that the oscillation threshold ($P_1 = 0$) is given by $Y_1 = A$. From equation (C.9) it follows that $Y_1 = \psi\eta$, and thus the weakest blowing pressure that gives oscillation is

$$\begin{aligned}\gamma_{th} &= \frac{1}{9}\left(\psi\frac{\eta}{\zeta} + \sqrt{3 + \left(\psi\frac{\eta}{\zeta}\right)^2}\right)^2 \\ &\simeq \frac{1}{3} + \frac{2}{3^{3/2}}\psi\frac{\eta}{\zeta} \simeq \frac{1}{3} + 0.5\frac{\eta}{\zeta}.\end{aligned} \tag{C.19}$$

This result is compared with the results of the HBM for a few sets of ζ and η in Table C.1. The table shows good agreement between the two methods and reveals that the musician must blow harder in the case of higher losses η (γ_{th} increases), but less hard when, for instance, the opening H is decreased ($\zeta \propto \sqrt{H}$ decreases).

Influence of the number of harmonics

Before using the HBM far from the oscillation threshold, a study of the influence of the number of harmonics N_p is required to optimize the precision while minimizing the calculation time.

Table C.1: Comparison of oscillation thresholds γ_{th} obtained using the VTM, eq. (C.19), and the HBM with $N_p = 9$ for some values of ζ and η

	Method	$\eta = 0.01$	$\eta = 0.02$	$\eta = 0.03$
$\zeta = 0.2$	VTM		0.3834	
	HBM		0.3872	
$\zeta = 0.4$	VTM	0.3458	0.3583	0.3708
	HBM	0.3461	0.3593	0.3730
$\zeta = 0.6$	VTM		0.3500	
	HBM		0.3504	

Close to the threshold the pressure wave is almost sinusoidal [43], and thus the first harmonic P_1 varies little with N_p. Further from the threshold, an increasing number of harmonics become important, and this influences P_1, as shown in Figure C.2 for N_p up to 49 harmonics. We have chosen to stop at $N_p = 9$ as P_1 varies little, and only at high γ, when we add the 11th harmonic, or even another 40 harmonics.

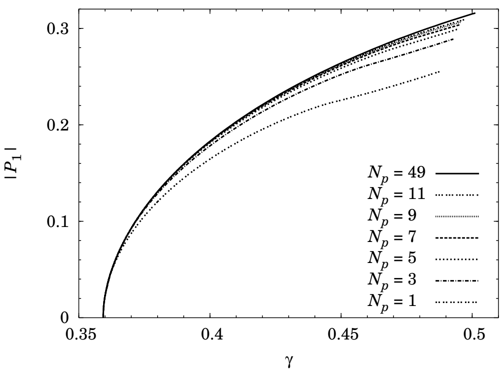


Figure C.2: P_1 versus γ for different values of N_p for $\zeta = 0.4$, $\eta = 0.02$, calculated using the HBM. The curves are cut at the beating threshold.

In other contexts, for instance for less visco-thermal losses, more harmonics may be needed, and it should be made clear that even if higher harmonics are relatively weak, they are important for the perception of the corresponding sound.

Here, and in all following figures, the curves calculated using the HBM end where the reed starts to beat. The fact that the beating threshold varies with N_p is due to large overshoots in $u(t)$ for small N_p as shown in Figure C.3. Beating occurs only for $N_p = 1$ and 3 at $\gamma = 0.494$.

Amplitude of first harmonic

Figure C.4 shows the variation of the first harmonic P_1 with respect to the blowing pressure γ obtained using the VTM, i.e. equation (C.18), and using the HBM for $N_p = 9$ harmonics using the cubic expansion and the exact nonlinearity, equations (C.15) and (C.10), respectively.

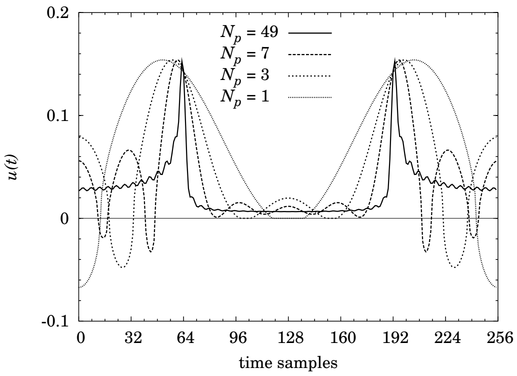


Figure C.3: One period of the oscillation of the volume flow for $\gamma = 0.494$ for various N_p. ($\zeta = 0.4$, $\eta = 0.02$)

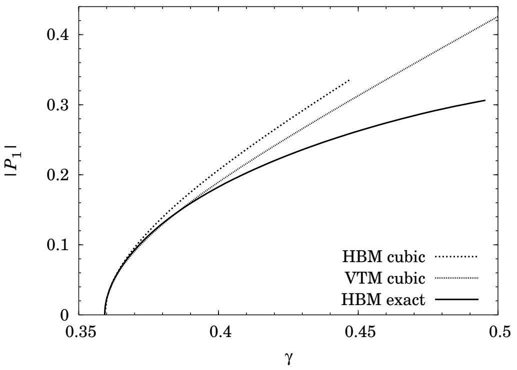


Figure C.4: Comparison of the first harmonic between the VTM cubic (eq. (C.18)) and the HBM using the cubic and exact versions of the nonlinear equation, $N_p = 9$, $\zeta = 0.4$, $\eta = 0.02$

As expected, the first harmonic approximation of the VTM for the cubic model is very good close to the threshold, where the pressure signal is almost sinusoidal, and quite good as γ approaches 0.4. The fact that the VTM cubic is better than the HBM cubic is a result of approximations having opposing effects. We also see that the three curves become one at the oscillation threshold.

Figure C.5 shows how P_1 varies with η and ζ. Firstly, the oscillation threshold γ_{th} decreases when ζ increases, whereas it increases when η increases. Indeed, η increases when the player increases the length of the pipe by closing tone holes. This therefore makes P_1 decrease, and the threshold of oscillation γ_{th} increase. This means that the player would have to blow harder to excite oscillation when the pipe becomes longer, at least for purely cylindrical pipes. For a real clarinet, however, the elongation of the pipe is achieved by closing tone holes, and Fuks and Sundberg [36] have shown that the musician does not necessarily need to blow harder for notes involving a long part of the pipe.

It should be mentioned that similar figures to these have been published in ref. [59], but with the continuation facilities of *Harmbal* , the results of the HBM may be followed quasi-continuously.

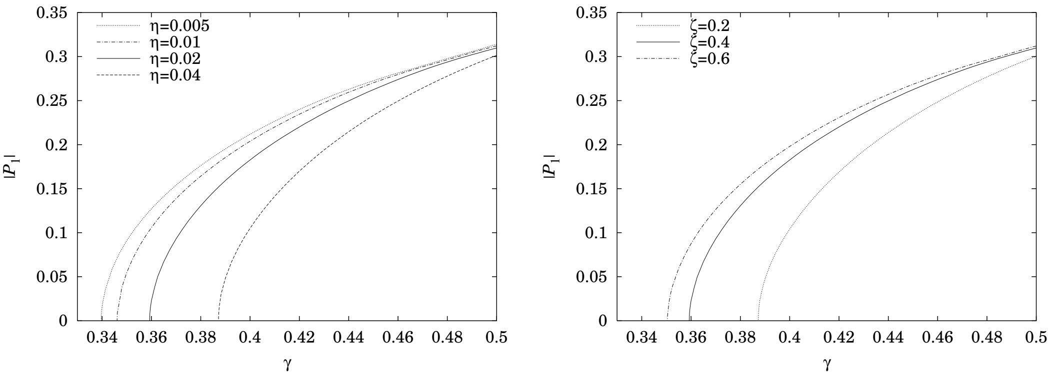


Figure C.5: Top: P_1 versus γ for different values of η, $\zeta = 0.4$ and $N_p = 9$. Bottom: P_1 versus γ for different values of ζ, $\eta = 0.02$ and $N_p = 9$

Register change

It is possible for a clarinet player to change the register and play the musical twelfth, which corresponds to the second eigenfrequency of the clarinet or the third harmonic, as the clarinet behaves as a closed-open pipe. This regime can be found using the HBM by setting as an initial condition a playing frequency equal to that of the third harmonic. As the impedance of this harmonic is smaller than that of the fundamental, the threshold, which now corresponds to $A = Y_3$, is greater.

From Figure C.6, the lowest register has higher acoustic pressure than the higher register for a given mouth pressure. At first this seems to conflict with the measurements of Fuks and Sundberg [36] and with the reports of clarinettists that the blowing pressure for a given dynamic level is largely independent of register. However, the sensitivity of the ear increases with increasing frequency up to about 3 kHz, so lower acoustic pressure should be necessary for the higher register to give the same perceived loudness. There is thus not necessarily a contradiction in this. Furthermore, our model does not take into account that in real performances, the reed may often operate in a beating regime, and the player may assist the upper register using the vocal tract. However, Figure C.6 shows that the threshold pressure increases for higher registers, which is in agreement with informal reports from clarinettists.

C.1.5 Effect of dispersion

Dispersion is the effect that the sound velocity varies with the frequency of the travelling wave. This results in inharmonicity of the pipe impedance, i.e. that the resonance frequencies of the pipe are no longer harmonically related.

At the oscillation threshold, the playing frequency f is still equal to the first pipe resonance f_p, but the latter is no longer equal to f_0. Instead, its value is determined by making the real

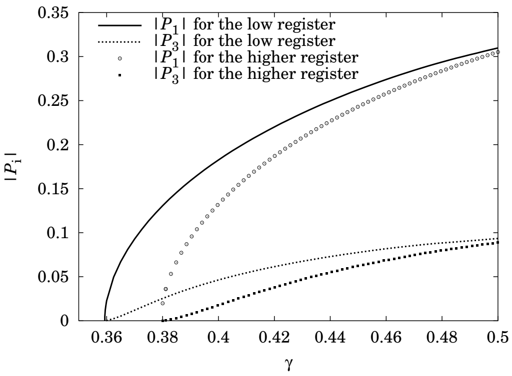


Figure C.6: Register of the fundamental tone of the clarinet and the register of the twelfth ($\zeta = 0.4$, $\eta = 0.02$, $N_p = 9$)

part of equation (C.8) equal to $\pi/2$ so that

$$\frac{f_p}{f_0} = 1 - \frac{2}{\pi}\psi\eta\sqrt{\frac{f_p}{f_0}}\,. \tag{C.20}$$

When the oscillation amplitude grows, higher harmonics start to appear. The higher pipe resonances are shifted upwards (relative to the first one) due to dispersion, while the reed movement must stay periodic, i.e. harmonic. To maximize the energy, the playing frequency therefore increases with increasing importance of the higher harmonics, as the HBM shows in Figure C.7. Note that the first order of the HBM does only involve the first harmonic and is thus not able to capture the increase of the playing frequency with increasing γ. The change from the threshold to $\gamma = 0.5$ is above 0.8 % (about 14 cents). The difference limen for a perceptible pitch shift of similar sounds is around 0.2 % (about 4 cents) [68]. Note that the clarinet player compensates for this effect by altering the embouchure.

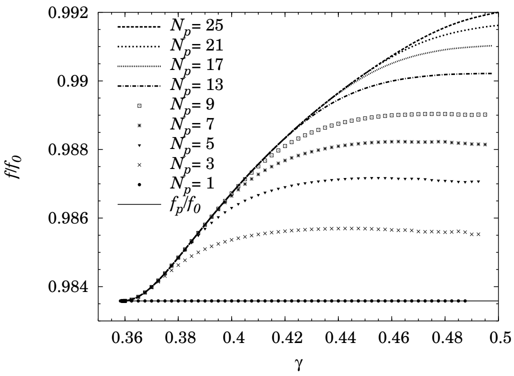


Figure C.7: Playing frequency using the HBM for different N_p for $f_0 = 100\,\text{Hz}$ and dispersion ($\zeta = 0.4$, $\eta = 0.02$). The line f_p/f_0, given by eq. (20), indicates the fundamental of the pipe.

The amplitude of the different harmonics do not change significantly when dispersion is added to the model, as seen in Figure C.8. However, the relative phase of the harmonics changes

with γ for the same reason as the playing frequency changes: higher, inharmonic partials of the pipe become important and shift the phases of the harmonics of the reed movement.

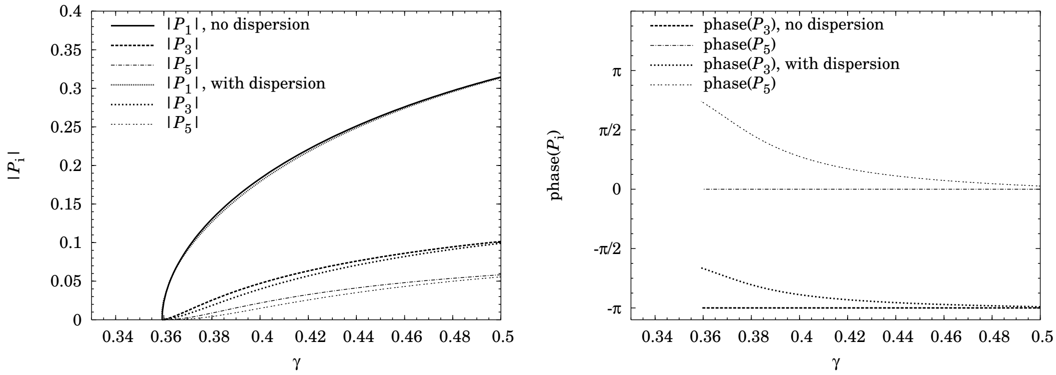


Figure C.8: Spectrum with and without dispersion (HBM, $N_p = 25$, $\zeta = 0.4$, $\eta = 0.02$). Top: modulus. Bottom: phase (P_1 real)

C.1.6 Influence of the reed resonance

In order to study the different effects separately, we now ignore dispersion but treat the reed as a spring with mass and damping using equation (C.4). From now on this will be referred to as Model B. (Model A is the simple reed model). Common values for the reed characteristics are [42]: $\omega_r = 23250\,\mathrm{s}^{-1}$ ($f_r = 3700\,\mathrm{Hz}$), $g_r = 2900\,\mathrm{s}^{-1}$, and $\mu_r = 0.0231\,\mathrm{kg\,m}^{-2}$.

Pipe resonances independent of reed resonance

As was the case when dispersion was included in the model, the playing frequency changes with the mouth pressure. In the study by Kergomard and Gilbert [58] of some aspects of the role of the reed, an approximation of the frequency is given. In the case where the first resonance of the pipe is far below the reed resonance:

$$\frac{f - f_p}{f_p} = -\frac{2}{\pi\sqrt{3}} R\zeta \left[1 + \frac{3}{4}(\gamma - \gamma_{th})\right], \tag{C.21}$$

R having been defined in Section C.1.2. The frequency at the threshold is thus given by $f_{th} = f_p(1 - \frac{2\zeta R}{\pi\sqrt{3}})$. The mouth pressure at the threshold is:

$$\gamma_{th} \simeq \frac{1-\alpha^2}{3-\alpha^2} + 2\left(\frac{1-\alpha^2}{3-\alpha^2}\right)^{\frac{3}{2}} \frac{\psi\eta\sqrt{\alpha\frac{f_r}{f_p}}}{\zeta} \tag{C.22}$$

where $\alpha = f_{th}/f_r$.

It is important to note that it is the damping of the reed, and not its mass, that makes the playing frequency change. Another point is that the damping of the reed decreases the playing

frequency compared to the first frequency of the pipe (this effect was characterized by a length correction of the pipe by Nederveen [73]). However, the variation of the playing frequency as γ increases is different. The frequency decreases due to the damping of the reed whereas it increases when dispersion is taken into account. We will compare the effects in a numerical example.

Suppose the first frequency of the clarinet is 100 Hz ($\omega_p = 628.3\text{s}^{-1}$), which implies that the effective reed resonance frequency is at the 37th harmonic of the pipe. In this case, the values of M and R are respectively 7.3x10^{-4} and 3.4x10^{-3}.

Figure C.9 shows that the playing frequency is slightly decreased (0.05 %, i.e. not perceptible) compared to the simple reed approximation and that it varies little between the oscillation and beating thresholds, about 100 times less than the variation caused by dispersion (cf Figure C.7, note the differing axes). Thus, as far as the playing frequency is concerned, the effect of the reed resonance is negligibly small when the pipe resonance is far from the reed resonance. It is also interesting to see that equation (C.21) is a good approximation in the entire regime.

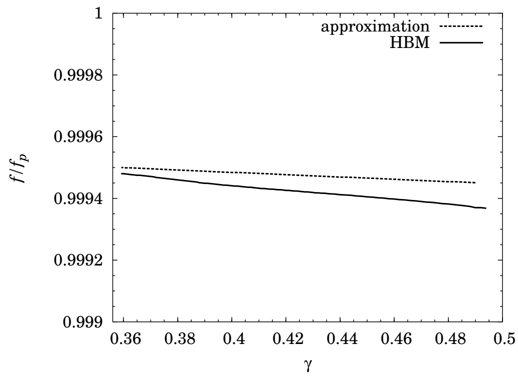


Figure C.9: Variation of the playing frequency with the mouth pressure when the mass and damping of the reed are taken into account: comparison between HBM and approximation (C.21) for $f_p = 100\,\text{Hz}$, $N_p = 9$, $\zeta = 0.4$, $\eta = 0.02$.

The change in the spectrum is also quite small, as shown in Figure C.10. The phase difference is completely negligible, and the magnitudes differ by less than 1 %.

The approximation of the reed as a simple spring is therefore rather good when the playing frequency is much smaller than the reed resonance frequency.

Pipe resonance interacting with reed resonance

Consider now a hypothetical clarinet with a pipe seven times shorter such that the first resonance frequency of the pipe is $f_p = 700\,\text{Hz}$. The fifth harmonic is thus just below the reed resonance frequency. In this case, the values of M and R are respectively 3.6x10^{-2} and 2.4x10^{-2}. Figure C.11 shows one period of the corresponding solution (model B) as well as a period for $M = R = 0$ (model A). The solution for model B was obtained from the solution for model A by increasing M and R progressively.

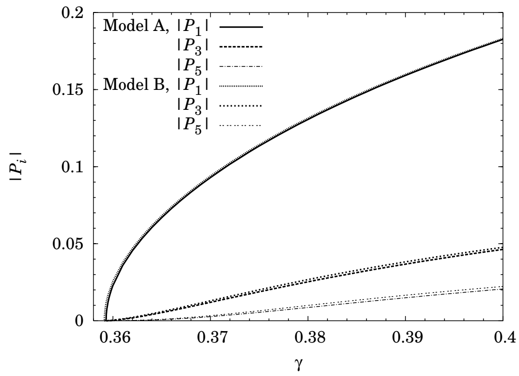


Figure C.10: Modulus of the harmonics for models A and B in the case $f_p = 100\,\mathrm{Hz}$ ($\zeta = 0.4$, $\eta = 0.02$, $N_p = 9$). γ is cut at 0.4 as the reed effect is largest near the oscillation threshold.

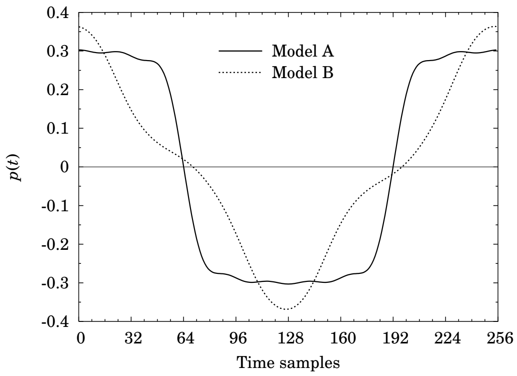


Figure C.11: Waveform $p(t)$ for models A and B when $f_p = 700\,\mathrm{Hz}$ ($\gamma = 0.4$, $\eta = 0.02$, $\zeta = 0.4$, $N_p = 9$)

The difference between models A and B as γ changes is shown in Figure C.12. Apart from the deviation of the harmonics, it is striking that the oscillation threshold is lowered so that a lower blowing pressure is needed to obtain a sound when the reed has mass and damping. This is explained by the fact that the third pipe resonance (the fifth harmonic) interacts with the peak resonance of the reed, and this stabilizes the oscillation [91].

The frequency changes by about 0.2 % in the range of γ between the two thresholds, as shown in Figure C.13. This might not be perceptible by the human ear, but the deviation from model A is about 0.5 %, which is above the difference limen [68]. Observe as well that approximation (C.21) is effectively no longer valid in the case where f_p is not far from f_r, especially for high mouth pressures.

C.1.7 Other regimes

The program can find many solutions but cannot decide about their stability. The clarinet produces a signal close to a square wave in the mouthpiece, and this is the solution that seems to be the most robust when changing one of the parameters. Other solutions seem to disappear

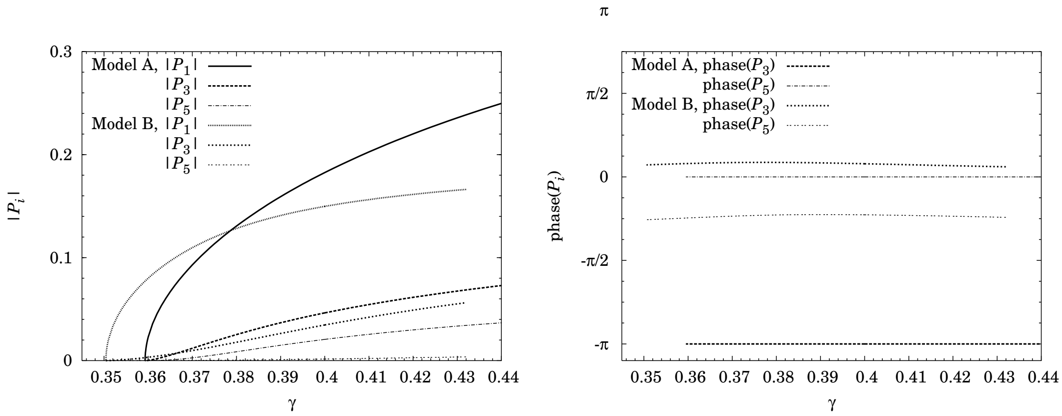


Figure C.12: The harmonics for models A and B, for $f_p = 700\,\mathrm{Hz}$. Top: modulus. Bottom: phase (P_1 chosen real)

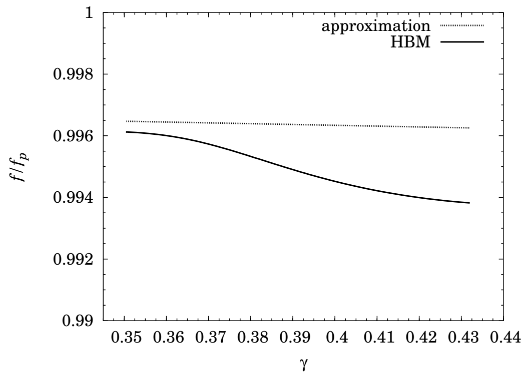


Figure C.13: Variation of the frequency with the mouth pressure when the mass and damping of the reed are taken into account, in the case of $f_p = 700\,\mathrm{Hz}$. Comparison to the approximation (C.21) a prori only valid if f_p is far from f_r

or turn to the square-wave solution. This can happen when we change the number of harmonics N_p or when for instance γ is changed, and the evolution may depend on the way the change is made.

For example the two following solutions are considered: the first one is the square solution and will be called solution A in the following. The other ones, called solutions B and C, are nonsquare and have the shapes as shown in Figure C.14. The first resonance of the pipe is 100 Hz, so the reed may be considered as a simple spring. But dispersion is taken into account.

In Figures C.15 and C.16, the different components of the pressure are represented as a function of γ for these solutions. They were obtained by decreasing γ. We can observe a jump for solutions B and C. However, if γ is increased from the threshold, only the square solution is obtained.

The variation of the playing frequency versus γ can as well give further details about these solutions. Solutions B and C seem indeed to operate at another frequency than solution A, as shown in Figure C.17.

These different solutions correspond to cases where the first harmonic is not necessarily the largest one. The third one can indeed be much larger, like for solution C, or even the seventh

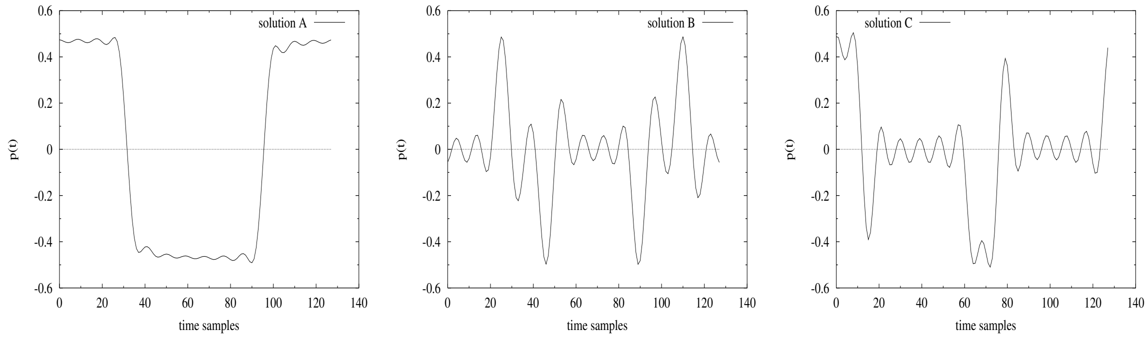


Figure C.14: One period of three different pressure waves $p(t)$ for the same set of parameters: $N_p = 13$, $\gamma = 0.485$, $\zeta = 0.4$ and $\eta = 0.02$

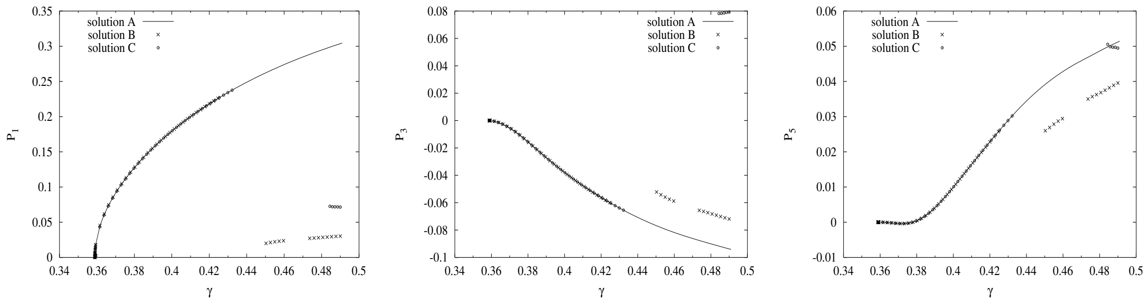


Figure C.15: P_i (i=1..5) versus γ for solutions A, B and C with $N_p = 13$, $\zeta = 0.4$ and $\eta = 0.02$

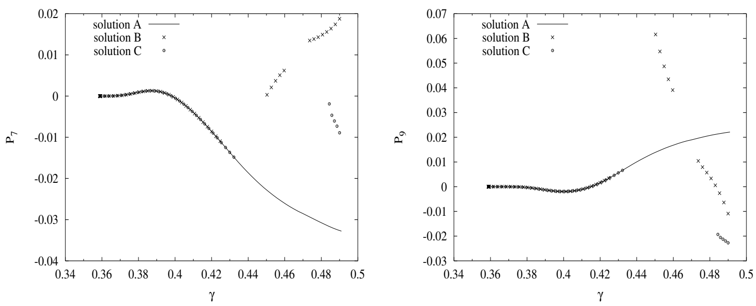


Figure C.16: P_i (i=7, 9) versus γ for solutions A, B and C with $N_p = 13$, $\zeta = 0.4$ and $\eta = 0.02$

or the ninth one, as for solution B. These "other" solutions appear only for large γ because it is only above $\gamma = 0.42$ that the higher harmonics have a non-negligible influence, as shown in Figure C.2.

Another feature of these solutions is that they cannot necessarily be retrieved for higher values of N_p. Thus solution C is not found above 13 harmonics and solution B above 29 harmonics. However, with other values of the parameters (for instance $\eta = 0.01$), they can be found for a hundred of harmonics.

So it is important to be aware that many solutions can be found with the HBM but some are not retrieved when N_p changes because the beating regime threshold changes with N_p (and

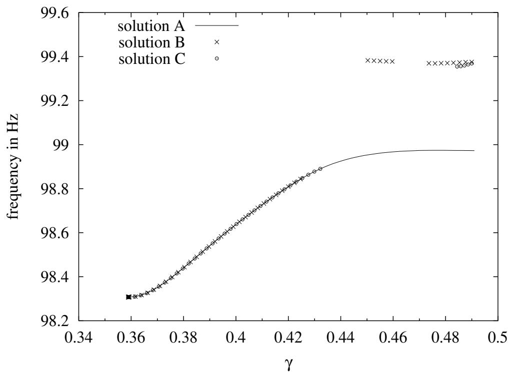


Figure C.17: Playing frequency for solutions A, B and C, as a function of γ

the solution is therefore in a domain where the model is not accurate), or when γ changes slightly. A question that then arises concerns the physicality of such solutions.

C.1.8 Comparison with real clarinet

It is interesting to compare the spectra of a clarinet played by a real musician with that of the model, in spite of the simplifications of the latter. Because the model predicts several different possible solutions for different oscillation modes with different spectra, a clarinettist was asked to attempt to produce notes with unusual spectral envelopes, using a spectrum analyzer as visual feedback. Such notes are difficult to produce on a clarinet played normally, and require that the clarinettist modify his embouchure.

Figure C.18 shows two spectra produced using the same fingering but different embouchures. The first is that for F3 ($f \simeq 156$ Hz, written G3). With this fingering, all holes are closed except for the three most remote from the mouthpiece. The F3 is played normally and the sound recorded on the instrument axis at the end of the bell. This fingering can also readily be used to play a note in the next register, C5 ($f \simeq 523$ Hz), by altering the embouchure rather than by opening the register hole (spectrum not shown). Also with this fingering, it is possible to play F3 with a third harmonic that is so strong that it can be heard simultaneously as a separate note. The second spectrum of Figure C.18 shows this. This sounds like a chord made from a weak F3 and a stronger C5. However, this playing regime is difficult for the player to sustain: it tends to "jump" either to F3 or C5.

Note that in the second case, although the third harmonic is easily the strongest, the fundamental of F3 is still present and that only the odd harmonics of F3 are present. Although the strongest spectral component is that for C5, the corresponding note in the second register, this is quite different from a note played in the second register, especially when the speaker key is used as a register hole. For such notes, there is no measurable power in frequencies corresponding to the first register, and the even harmonics are not in general much weaker than the odd harmonics. (A database of clarinet sound spectra and impedance spectra is at [96].)

So clarinettists can produce very different spectral envelopes. To do so, however, they use modifications in several of the embouchure parameters, and perhaps the vocal tract. So this

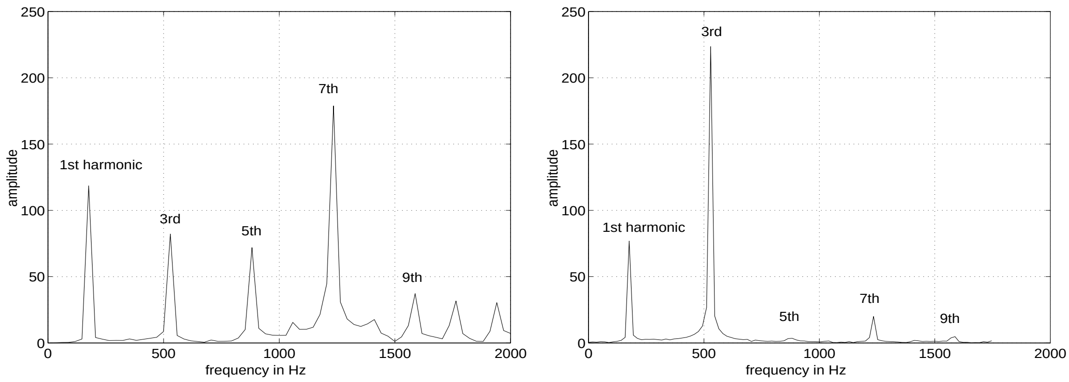


Figure C.18: Spectra of different sounds recorded at the end of the clarinet bore. Top: note F3. Bottom: player sounding both F3 and C5 together.

ability is not comparable with the ability of the HBM to find various solutions for the same sets of values of the parameters.

C.1.9 Conclusion

In the simplest model, which assumes no dispersion and the reed to be a simple spring without mass and damping, we found good agreement between the variable truncation method (VTM) and the harmonic balance method (HBM) close to the oscillation threshold. The playing frequency was equal to the first resonance of the pipe, and the Fourier components of the pressure in the mouthpiece were real.

By adding dispersion to the model, the playing frequency was significantly lowered (1–2 %), especially close to the oscillation threshold (small γ). Here, the harmonics of the pressure showed large deviation from the nondispersive case, the phase in particular.

When common values for the mass, damping, and stiffness of the reed were introduced (but no dispersion), there was only a minor change for ω_r far from ω_p, while for $\omega_r/\omega_p \simeq 5.3$, there was a small lowering of the playing frequency (of about 0.5 %), a significant one for the oscillation threshold, and a phase shift of the higher harmonics of the pressure in the mouthpiece. Mass and damping should thus be considered when the first resonance of the pipe is quite close to the reed resonance.

In our study we have encountered problems related to the physical stability of the solutions found by the HBM. When the number of harmonics N_p is increased, more solutions can be found, but it seems that only the rounded square solutions are maintained when N_p is increased (above 13 and 29 in our two cases). A study of the stability of the solutions is required.

The program *Harmbal* offers the possibility of detailed studies of the control parameters, but also for example the influence of the vocal tract or the compliance of the reed and the reed flow. A model of a real clarinet for any note could then be obtained by using a database of clarinet impedance measurements, available for example at [96], instead of an approximate analytical function.

C.2 Modification de *Harmbal* pour l'étude du conduit vocal

Ce travail a fait l'objet de l'encadrement d'un stagiaire de DEA, Matthias Demoucron [22].

Nous commencerons par présenter succintement la structure générale du programme *Harmbal* afin d'exposer ensuite plus facilement les modifications que nous lui avons apportées.

C.2.1 Structure du programme *Harmbal*

Harmbal est constitué d'un ensemble de programmes dont les principaux sont les suivants :

- Le programme principal *main.c* gère le déroulement général du processus : il lance l'initialisation des paramètres, la boucle d'équilibrage harmonique et l'affichage des résultats, une fois la solution trouvée (ou l'erreur, si aucune solution n'est trouvée).
- Le programme *interface.c* enregistre les options voulues par l'utilisateur lors de l'appel du programme et construit le fichier de paramètres du calcul et l'itération.
- *harmbal.c* est le programme contenant le déroulement du calcul.
- *instr.c* gère les fonctions communes à tous les modèles utilisés.
- *clarinet.c* contient les modèles de résonateurs (tuyau simple, conique...) et d'excitateurs (modèle complet ou cubique) qui peuvent être utilisés pour le calcul.

Il a donc été construit de manière à ce que l'utilisateur n'ait que ce dernier fichier à modifier s'il souhaite utiliser d'autres modèles de résonateurs (pour le calcul de Z) et/ou d'autres modèles non-linéaires dans le calcul par équilibrage harmonique, sans avoir à toucher aux autres parties du programme.

Le résultat final est écrit dans un fichier .pmt qui comprend à la fois la valeur de tous les paramètres (γ, ζ, nombre d'harmoniques, ...) et le vecteur [fréquence de jeu, harmoniques de la pression].

De plus, le lancement du calcul nécessite la connaissance d'une solution approchée qui sera utilisée comme vecteur initial de l'itération. Or, lorsque l'on souhaite modifier les paramètres des modèles, *Harmbal* rencontre parfois des problèmes de convergence si la variation de ces paramètres est importante. Un autre programme, *hbmap*, permet donc de faire varier progressivement les paramètres de leur valeur initiale pour laquelle une solution est connue à la valeur finale pur laquelle on cherche une solution. Le résultat de toutes les itérations successives est écrit dans un fichier .dat (chaque ligne correspond à : paramètre qui varie, fréquence de jeu, valeurs des différents harmoniques de la pression). Ce programme est également très intéressant pour l'étude du spectre et de la fréquence de jeu en fonction de la variation d'un paramètre comme γ ou ζ.

C.2.2 Modifications à implémenter

L'influence du conduit vocal se traduit en terme d'impédance additionnelle. Il suffit donc seulement, a priori, d'ajouter l'impédance du CV à celle de la clarinette. Ce n'est cependant pas

si simple puisque jusqu'à présent, *Harmbal* ne fonctionnait qu'avec des impédances analytiques et il est bien évident qu'aucune impédance analytique n'est disponible pour le CV. Il faut donc qu'*Harmbal* puisse interpoler la valeur de l'impédance à la fréquence de jeu qu'il calcule, en fonction des points de mesure de part et d'autre de cette fréquence. D'autre part, cette interpolation est également à mettre en place pour la clarinette afin de pouvoir obtenir plus de réalisme en utilisant également des impédances mesurées ou simulées pour celle-ci. Nous devrons donc ajouter un nouveaux modèle de résonateur qui pourra utiliser des fichiers de valeurs discrètes (expérimentales ou simulées) pour l'impédance.

D'autre part, nous avons vu que les équations étaient les mêmes dans le cas avec CV que sans CV à condition de remplace Z_{clar} par $Z_{clar}+Z_{CV}$ et P_{clar} par $\Delta P = P_{clar} - P_{bouche}$. *Harmbal* va donc réaliser les itérations sur ΔP. Or comme les grandeurs qui nous intéressent au final sont P_clar et P_{bouche}, il faut également programmer l'écriture de fichiers .pmt avec la donnée de ces grandeurs. Il est de plus intéressant de pouvoir accéder aux valeurs interpolées de l'impédance qui seront ainsi consignées dans un autre fichier.

De plus, un programme de type *hbmap* doit être créé pour pouvoir faire varier l'impédance du CV. En effet, si celle-ci est importante, il s'avère souvent impossible d'obtenir une solution à partir de la solution sans CV. Il faut donc pouvoir faire varier son amplitude progressivement.

C.2.3 Implémentation de l'interpolation

Nous commençons par interpoler l'impédance de la clarinette car nous pourrons ainsi vérifier l'exactitude des résultats trouvés en utilisant l'interpolation, en les compararant avec ceux trouvés pour l'expression analytique de l'impédance. Ceci fait, il sera assez évident d'adapter le programme dans le cas où l'on veut interpoler l'impédance du conduit vocal.

C.2.4 Interpolation de l'impédance de la clarinette

Nous supposons donc ici que l'impédance de la clarinette n'est plus donnée par une fonction analytique, mais par une suite de valeurs à des fréquences successives. Les fichiers dans lesquels seront lus ces impédances "expérimentales" contiendront d'abord les fréquences, puis les parties réelles, et ensuite les parties imaginaires de l'impédance correspondant à ces fréquences. Lors de l'appel de *Harmbal*, le fichier dans lequel ces valeurs devront être prises sera précédé de l'option -i, option qu'il nous faut ajouter au programme (dans *interface.c*).

```
case 'i' :
        if(argc<1)
          hberr("option -i should be followed by filename",NULL);
        (*optionlist)[p].field = string("impmodel");
        (*optionlist)[p].value = 105;
        p++;
        impfilename=string(*(argv++));
        nech=lengthfile(impfilename);
        nech=nech/3;
        argc--;
        break;
```

La variable *nech* (passée en global) contenant le nombre d'échantillons lus dans le fichier nous permettra notamment d'allouer l'espace mémoire nécessaire aux vecteurs utilisés.

Dans la fonction permettant le choix du résonateur (*clarinetresonator*, dans *clarinet.c*), nous ajoutons le modèle 105 :

```
case 5: /*impedance given by experimental values*/
   params = getimpvalues(impfilename);
   reson = initresonator(clarinet_experimental, params, np);
   break;
```

Ces lignes permettent de copier les valeurs contenues par le fichier *impfilename* dans la vecteur *params* (sous la même forme : fréquences, puis partie réelle, puis partie imaginaire) et de faire pointer la variable *reson* vers le modèle de résonateur (*clarinet_experimental*)qui permet l'interpolation.
La fonction *getimpvalues* est écrite ci-après et placée dans *interface.c* :

```
double *getimpvalues(char *filename)
{
  FILE *impfile;
  int n, m,i;
  double *values, val;
  char line[80];
  char c = 1;

n=0;
if((impfile = fopen(filename, "r"))==0)
   hberr("getimpvalues(): couldn't open file",filename);
values = allocvec(3*nech);
while (fgets(line,80,impfile)!=NULL)
 {
 if (sscanf(line, "%lf", &val)==EOF)
       hbwarn("getvalues():error in impfile, skipped");
  values[n]=val;
 n++;
 }
fclose(impfile);
return values;
}
```

Enfin, une fonction *clarinet_experimental* (dans *clarinet.c*) permet l'interpolation de la valeur de l'impédance à partir des valeurs expérimentales données dans *params*, à la fréquence *freq* et pour ses N harmoniques. L'interpolation a été choisie linéaire et s'effectue sur l'impédance pour les harmoniques pairs mais sur les admittances pour les harmoniques impairs. En effet, pour ceux-ci, nous sommes au niveau d'un maximum d'impédance et donc l'interpolation introduirait une erreur énorme si elle était faite directement sur l'impédance.

Cette fonction alloue un espace mémoire au vecteur Z qui contiendra les valeurs des parties réelles et imaginaires de l'impédance interpolée, vérifie que la fréquence donnée n'est ni trop petite, ni trop grande par rapport aux valeurs contenues dans le vecteur *params*, boucle jusqu'à

avoir les deux fréquences entre lesquelles se trouve la fréquence à laquelle il faut interpoler, puis calcule les coefficients de l'interpolation linéaire et les valeurs interpolées.

```
double *clarinet_experimental(int N, double freq, double *params)

{
  double ar,br,ai,bi,x1,x2,yr1,yr2,yi1,yi2,zr1,zr2,zi1,zi2,Yr,Yi;
  complex Y1,Y2,Zint;
  double *Z;
  int i,k,n,sup;


  Z = allocvec(2*N);
  i=0;
  if (freq<params[i])
    hberr("freq given is too small compared with experimental values.",NULL);
  for (k=1;k<N;k++)
    {
    sup=0;
    while (params[i]<k*freq && i<nech)
      {
      if (i==nech-1)
        {
sup=1;
        break;
        }
      i++;
      }
    if (sup!=1)
      {
      i--;
      x1=params[i];
      x2=params[i+1];
      zr1=params[i+nech];
      zr2=params[i+1+nech];
      zi1=params[i+2*nech];
      zi2=params[i+1+2*nech];
      if ((k% 2)==0)              % Harmonique pair : interpolation sur Z
      {ar=(zr1-zr2)/(x1-x2);
      br=(zr2*x1-zr1*x2)/(x1-x2);
      ai=(zi1-zi2)/(x1-x2);
      bi=(zi2*x1-zi1*x2)/(x1-x2);
      Z[k]=ar*k*freq+br;
      Z[k+N]=ai*k*freq+bi;}
      else                        % Harmonique impair : interpolation sur Y
       {Y1=Cdiv(Complex(1,0),Complex(zr1,zi1));
       Y2=Cdiv(Complex(1,0),Complex(zr2,zi2));
       yr1=Y1.re;
       yr2=Y2.re;
       yi1=Y1.im;
       yi2=Y2.im;
       ar=(yr1-yr2)/(x1-x2);
       br=(yr2*x1-yr1*x2)/(x1-x2);
       ai=(yi1-yi2)/(x1-x2);
```

```
      bi=(yi2*x1-yi1*x2)/(x1-x2);
      Yr=ar*k*freq+br;
      Yi=ai*k*freq+bi;
      Zint=Cdiv(Complex(1,0),Complex(Yr,Yi));
   Z[k]=Zint.re;
   Z[k+N]=Zint.im;
   }
      i=0;
      }
   else
     {
       Z[k]=0;
       Z[k+N]=0;
i=0;
     }
   }
  Z[0]=Z[N]=0;
  return Z;
}
```

Pour un pas de discrétisation de l'impédance de 8 Hz, l'erreur est inférieure à 0.01%.

C.2.5 Prise en compte du conduit vocal

On souhaite maintenant pouvoir effectuer le calcul en ajoutant une impédance du conduit vocal mesurée expérimentalement au modèle de clarinette utilisé. Nous construisons donc une nouvelle option lors de l'appel de la fonction :

```
 case 'b' : /*like ``buccale''*/
        if(argc<1)
          hberr("option -b should be followed by filename",NULL);
        (*optionlist)[p].field = string("impmodel");
        (*optionlist)[p].value = 106;
        p++;
        impfilename=string(*(argv++));
        nech=lengthfile(impfilename);
        nech=nech/3;
        argc--;
        break;
```

Cette option est en tout point pareille à l'option i. Du fait que l'on utilise dorénavant deux impédances placées en série (celle de la clarinette et celle du conduit vocal), nous devons définir un nouveau type de résonateur (modèle 106) dans la fonction *clarinetresonator* :

```
 case 6: /*vocal impedance given by experimental values*/
    np = 3;
    params = getparams(paramlist, stringlist(np,"resfreq","nu","disper"),YES);
    Zexp = getimpvalues(impfilename);
    reson = initresonator(clarinet_totalimp2, params, np);
    break;
```

A nouveau, pour ne pas toucher en détail au programme, la variable Zexp est passée en global. Ce résonateur utilise la fonction analytique (modèle 101) et ajoute simplement l'interpolation de l'impédance du conduit vocal aux fréquences désirées :

```
double *clarinet_totalimp2(int N, double freq, double *params)
{
  int i;
  double *Ztot, *Za, *Z;

  /* allocate memory */
  Ztot = allocvec(2*N);
  Za = allocvec(2*N);
  Z = allocvec(2*N);

  /* calculate the impedances */
  Z = clarinet_tubeimp1(N, freq, params);
  Za = clarinet_experimental(N, freq, Zexp);

  /* add the two impedances and return the result */
  for (i=0; i<2*N; i++)
    Ztot[i] = Z[i] + Za[i];
  free(Z);
  free(Za);
  return Ztot;
}
```

Le dernier problème à résoudre concerne l'affichage et l'écriture des résultats. La grandeur qui nous intéresse est l'impédance dans le bec de la clarinette. Harmbal trouve un P qui est en fait la différence entre la pression dans la bouche et celle dans la clarinette. Nous allons donc utiliser le débit U pour calculer (par $P = ZU$) les pressions qui nous intéressent. En revanche, dans les fichiers de paramètre (*.pmt) que Harmbal utilise pour le calcul, il faut garder la différence de pression.
Nous ajoutons donc, lors de l'écriture des résultats, les lignes suivantes :

```
 if (reson->model==106 || reson->model==107){
        freq = hbinfo->freq;
        if (reson->model==106){
              np = 3;
              params = getparams(paramlist,stringlist(np,"resfreq","nu","disper"),YES);
              Z = clarinet_tubeimp1(Npart, freq, params);
              Zt = clarinet_totalimp2(Npart, freq, params);
        }
        else{
              Z = clarinet_experimental(Npart, freq, Zcexp);
              Zt = clarinet_totalimp3(Npart, freq, params);
        }
       U = fft(u, Nsamp,Npart);
       Pc = allocvec(2*Npart);
       Pm = allocvec(2*Npart);
       for (k=0;k<Npart;k++){
```

```
      Pc[k]=U[k]*Z[k]-U[k+Npart]*Z[k+Npart];
      Pc[k+Npart]=U[k]*Z[k+Npart]+U[k+Npart]*Z[k];
      Pm[k]=Pc[k]-P[k];
      Pm[k+Npart]=Pc[k+Npart]-P[k+Npart];
     }
   printf("Pc:\n");
   printfreqvec(Pc,Npart);
   fid = fopen("itno.dat","w");
   fprintf(fid,"%i",conv);
   fclose(fid);
   beat = plot_uswept(u, p, x, Nsamp, "uswept.dat");
   printctrlpar(lindiff,nonlin,reson,beat);
   //plot_ufcn(nonlin->fcn->fcn,"uofp.dat",1,nonlin->params,nonlin->np);
   fprintfreqvec(Pm,Npart,"Pm.dat");
   fprintfreqvec(Pc,Npart,"Pc.dat");
   fprintfreqvec(P,Npart,Pfile);
   fprintfreqvec(Zt,Npart,''Z.dat'');
   writeparams(outfname,paramlist,P,Npart,Nsamp,hbinfo->freq);
   writeparams("zout.pmt",paramlist,Zt,Npart,Nsamp,hbinfo->freq);
   if (map == 1){
      writeparams("poutb.pmt",paramlist,Pm,Npart,Nsamp,hbinfo->freq);
      writeparams("poutc.pmt",paramlist,Pc,Npart,Nsamp,hbinfo->freq);
} }
```

Les lignes précédentes calculent les valeurs des impédances de la bouche et de la clarinette pour la fréquence de la solution trouvée puis, à partir du vecteur U (transformée de Fourier du débit entrant dans l'instrument), effectuent les calculs $P_c = Z_c U$ et $P_m = P_c - P$. Les valeurs des harmoniques de P_c, P_m, P et de l'impédance totale à la fréquence solution sont écrits respectivement dans les fichiers *Pc.dat*, *Pm.dat*, *P.dat* et *Z.dat*.
Les autres fichiers écrits (*poutb.pmt*,*poutc.pmt* et *zout.pmt*) sont utilisés par *hbmap* pour garder une trace de la progression du calcul, et par d'autres programmes d'analyse des résultats, écrits pour *matlab* mais qui ne sont pas présentés ici.

C.2.6 Options supplémentaires et programmes annexes

Nous ne présentons pas le cas où les deux impédances sont interpolées (option -e) car celui-ci n'apporte pas de nouveauté par rapport à ce qui précède : ce dernier cas se déduit en effet très facilement des deux précédents.

Nous avons déjà évoqué les problèmes de convergence que rencontre *Harmbal* lorsque les paramètres du calcul changent (prise en compte de la dispersion, variation de ν ou de ζ ...). Il est donc aussi nécessaire d'intégrer ces nouveaux modèles dans le programme *hbmap*, qui permet de faire évoluer progressivement les paramètres vers la valeur souhaitée.

Nous ne connaissons pas, a priori, les solutions du système avec conduit vocal. Il est donc nécessaire d'utiliser la solution sans conduit vocal comme vecteur initial de l'itération. Pour faciliter la convergence lorsque cette solution initiale s'avère trop éloignée de la solution finale, un petit programme écrit en Perl par Matthias Demoucron, *vmap*, inspiré de *hbmap*, fait évoluer l'impédance additionnelle de zéro jusqu'à sa vraie valeur avec un pas choisi par l'utilisateur, ce qui permet, dans la plupart des cas, d'obtenir par continuation la solution désirée.

Annexe D

Sondage de clarinettistes à propos de l'influence du conduit vocal

D.1 En Australie

Dix-sept clarinettistes australiens ont été interrogés, “mesurés” et enregistrés. Sept musiciens étaient professionnels (dont certains très réputés comme le célèbre jazzman Don Burrows ou bien les solistes de l'Orchestre Symphonique et de l'Opéra de Sydney) et les autres, mis à part trois amateurs, étaient pour la plupart leurs élèves, de haut niveau.

Excepté Don Burrows, ils ont tous suivi une formation classique et jouent principalement de la musique classique.

Voici le questionnaire, accompagné des instructions concernant la série de mesures d'impédance et les enregistrements, qui leur a été proposé.

THE UNIVERSITY OF NEW SOUTH WALES

THE UNIVERSITY OF NEW SOUTH WALES

SCHOOL OF PHYSICS

Subject Information Statement and Consent Form

Research project:

Interaction of wind instruments with the vocal tract

Subject selection and purpose of study

You *(i.e. the subject)* are invited to participate in a study of the acoustical interaction of musical instruments with the vocal tract. We *(i.e. the investigators)* hope to learn how the acoustic properties of the human vocal tract affect the acoustics of the reed and instrument under different conditions. We study this using a 'model clarinet', which shall ask you to pretend to play. While you are pretending to play, the 'model clarinet' will actually emit a specially synthesized sound into your mouth, and a microphone will record the way in which this sound interacts with your vocal tract. From this we can deduce how your vocal tract would affect a real clarinet and reed. You were selected as a possible participant in this study because of your background as a clarinettist.

Description of study and risks

If you decide to participate, we will ask you to play some notes on a real clarinet, and then to try to repeat the actions on the model clarinet. The whole procedure will take rather less than one hour. You may ask one of the investigators for a more precise estimate of the time required.
There are no serious risks involved. The sound level will be checked by the operator before the experiment begins and is not loud. You may come into contact with the sound source and microphone. These will be disinfected before the experiment.

Confidentiality and disclosure of information

Any information that is obtained in connection with this study and that can be identified with you will remain confidential and will be disclosed only with your permission or except as required by law. If you give us your permission by signing this document, we plan to publish the results in a scientific journal. In any publication, information will be provided in such a way that you cannot be identified.
Complaints may be directed to the Ethics Secretariat, University of New South Wales, SYDNEY 2052 AUSTRALIA (phone 9385 4234, fax 9385 6648, email ethics.sec@unsw.edu.au).

Your consent

FIG. D.1 – Questionnaire

QUESTIONNAIRE AND INSTRUCTIONS

You will be asked:
A few questions about your musical background as a clarinet player
A few questions about the influence of the vocal tract in playing the clarinet
To mime a few note/embouchure combinations on the fake clarinet for vocal tract acoustical measurements
To play these note/embouchure combinations on the lab's clarinet for recordings

1) Musical background
a) For how long have you been playing the clarinet?
b) Where did you study the clarinet? Do you have a classical training? If not, what style did you study (eg jazz, klezma…)
c) Highest formal or professional qualification?
d) Which kind of music do you play mostly (classical, jazz, …)?

2) What is your personal opinion about the importance to your playing of the vocal tract shape: ie position of tongue in the mouth, soft palate, vocal folds (but not including the bite).

1) Is it important to the pitch of the note played? (circle one)
Very important somewhat important only slightly important not important at all

2) Is it important to the tone colour of the note played? (circle one)
Very important somewhat important only slightly important not important at all

In what way does it change the tone colour (briefly)

3) Not counting changes in the bite, do you change the shape of the tract? If yes, for what purpose? Is there any special configuration for any special purpose?

4) Think about the normal position of your tongue in playing. Does it touch the lower lip? The lower teeth? About how far, in mm, do you estimate that your tongue is from the lip or teeth?

5) Could you sketch some configurations roughly to show us what you mean?

3) and 4) Mime or play the following note/embouchure combinations (musical notations of each will be provided):

1) low G (G3) using your normal embouchure for that note
2) throat G (G4) using your normal embouchure for that note
3) middle G, three fingers (G5) using your normal embouchure for that note
4) altissimo G (G6) using your normal embouchure for that note
5) finger a high C (C6) but use the embouchure alone to bend it down—to G if possible.
6) Imagine that you are asked to slur (no articulation at all) from D on the 4th line (D5) to low G (G3). Think of the embouchure that you would use to cause the clarinet to jump down to the low register. We now want you to hold that embouchure (the one that makes it jump, not the embouchure you'd use once the G3 sounds) for several seconds while we measure it.
7) The note for which you have the tightest embouchure
8) Any suggestions from you

Fig. D.2 – Questionnaire

Résultats

Excepté un amateur, tous les musiciens interrogés considèrent que le conduit vocal a une influence très importante sur le timbre. En ce qui concerne la justesse, quatre musiciens considèrent que le conduit vocal est important, les autres considérant qu'il est très important.

Je ne citerai ici que les musiciens qui ont été les plus capables de dire en quoi consistait réellement leur utilisation du conduit vocal (en particulier au niveau de la bouche). Je conserve ici leur vocabulaire de musicien qui ne correspond parfois qu'à des images mentales et musicales. Tout se passe avant tout par sensations et par impressions même si certains enseignants ont tenté d'intellectualiser ce qu'ils font pour bien comprendre les phénomènes mis en jeu et pouvoir ainsi les expliquer à leurs élèves.

En sus du pitch bend, Deborah De Graaf utilise le conduit vocal pour éclaircir ou assombrir le son ainsi que pour lui donner du relief, en fonction du contexte musical. Elle l'utilise essentiellement pour les notes à tuyau court, plus facilement influençables par le conduit vocal. Pour éclaircir le son, elle utilise la configuration /i/ ("hee" qu'elle décrit ainsi : arrière et milieu de la langue placés haut dans la bouche, palais mou abaissé, gorge fermée. Pour l'assombrir, elle utilise un /æ/ qu'elle décrit par "haw" avec le palais mou haut, l'arrière de la langue abaissé et la gorge ouverte. Elle préfère de loin la configuration /i/ qui lui permet d'avoir un son plus brillant et plus stable ainsi qu'une articulation très rapide car le bout de la langue peut être ainsi très proche de l'extrémité de l'anche. Elle demande d'ailleurs à ses élèves de garder tant que possible cette position en permanence. D'autre part, pour elle, seules les notes dites à tuyau court sont vraiment possibles à influencer avec le conduit vocal.

Margery Smith lève son palais mou pour avoir plus de résonance et de projection. Dans le registre grave, sa langue est basse et arquée, à environ un cm de la lèvre inférieure. Dans l'aigu, la langue remonte et se déplace vers l'avant, tout en s'aplatissant sur le dessus. Elle utilise "ee" pour rendre le son plus brillant, "oo" pour avoir plus de résonance et "aw" for baisser le son lorsqu'elle est trop haute. Dans ce cas, elle souffle plus fort afin de conserver une homogenéité dans le son.

Ian Sykes préfère avoir la langue haut placée dans la bouche afin d'obtenir un son concentré. Il utilise le conduit vocal pour changer de registre, pour de larges intervalles ainsi que pour des effets spéciaux comme les glissandi ou les multiphoniques.

Lawrence Dobell enrichit le son en harmoniques en ouvrant la cavité buccale. Il ouvre également la gorge pour descendre de registre. Cependant, il utilise avant tout les muscles faciaux qui changent la pince de l'anche.

Catherine McCorkill utilise le conduit vocal pour changer l'intonation et le timbre. Elle a l'impression que son palais mou s'arque pour avoir un son plus centré. Elle pense en fait à concentrer le son par le nez.

Nous pouvons donc constater que le placement de la langue et la position du palais mou dépendent de manière assez importante du musicien, puisque des positions opposées semblent pouvoir permettre d'obtenir les mêmes effets.

Voici quelques esquisses réalisées par les musiciens interrogés à propos du placement de la langue et de la configuration buccale. Seuls deux musiciens ont réalisé une esquisse complète incluant toute la cavité buccale. L'un est l'élève de l'autre et cela se remarque !

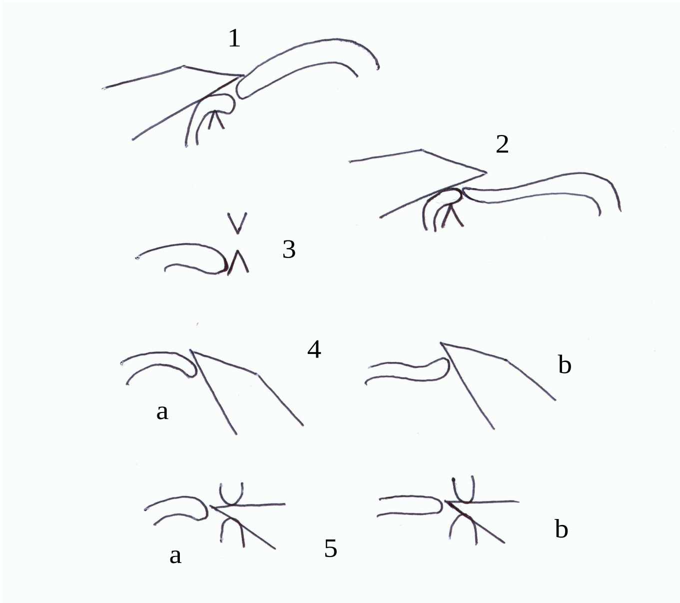


Fig. D.3 – Esquisses réalisées par cinq musiciens pour décrire la configuration de leur cavité buccale en situation de jeu. Pour les deux musiciens du bas, ils utilisent un placement de la langue différent suivant qu'ils jouent dans le registre grave (a) ou aigu (b).

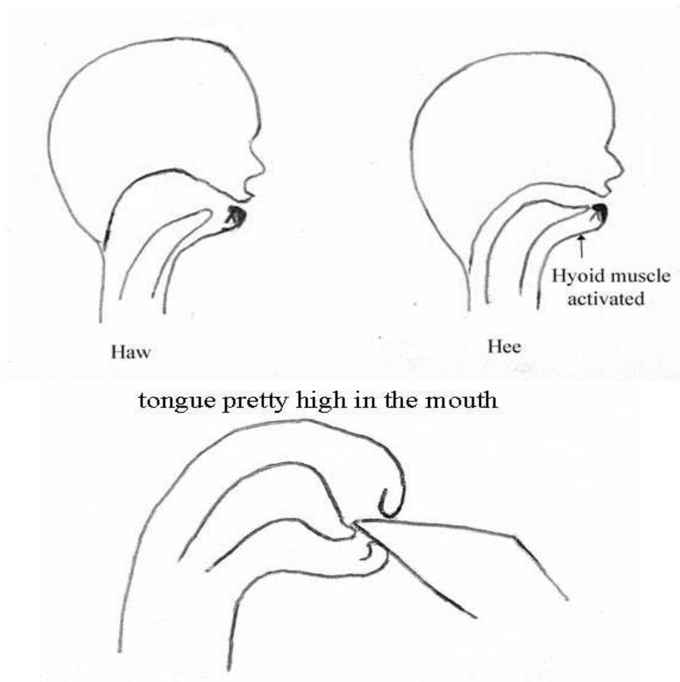


Fig. D.4 – Esquisses réalisées par Deborah De Graaff en haut et son élève en bas. Deborah n'utilise que très rarement la configuration "Haw" qu'elle n'aime pas.

D.2 En Europe

Un tel questionnaire n'a pas été réalisé de manière aussi systématique, mais j'ai cependant questionné un grand nombre de professionnels français au moment de commencer ma thèse et la quasi totalité des musiciens m'ont répondu en terme de voyelle : le /a/ est utilisé pour le grave et le /i/ pour l'aigu, sans guère plus de commentaires.

Durant la rédaction du chapitre 4, j'ai discuté plus en détail avec quelques clarinettistes européens, d'horizons assez différents, afin d'exploiter au mieux les résultats obtenus. Ce sont donc eux qui sont à l'origine des commentaires des musiciens détaillés dans la partie 4.6.1.

Pierre-André Taillard a particulièrement détaillé son utilisation du conduit vocal. Pour lui, celui-ci intervient pour au moins quatre raisons :

- pour rendre possible une émission propre de la note à jouer, ce qui est particulièrement vrai dans l'aigu (pour éviter le “buzz” de la clé de registre) et dans le piano
- pour augmenter la plage d'amplitude et faciliter son contrôle du pianissimo au fortissimo
- pour modifier le timbre de la note à jouer
- pour contrôler l'intonation

De plus, d'après lui, dans une gamme bien équilibrée, une configuration en direction du /i/ est utilisée pour les notes à petit tuyau. C'est peut-être un moyen d'éviter un changement de pression brutal au passage de registre. Il est bien plus aisé de faire un petit mouvement de langue qu'une grosse correction de pression, particulièrement dans la nuance piano. La configuration en /æ/ des notes à long tuyau produit un son détimbré lorsqu'elle est utilisée pour les notes à petit tuyau. C'est certainement une des raisons de cet “accordage” constant, sinon la raison principale.

Annexe E

Banque de données de mesures d'impédance du conduit vocal de clarinettistes

Les mesures sont présentées par clarinettiste, pour cinq clarinettistes professionnels réputés qui ont participé à l'expérience.

E.1 Deborah de Graaff

Deborah de Graaff est une enseignante très reconnue du Conservatoire de Musique de Sydney. Parallèlement, elle se produit en concert et prépare une thèse sur les stratégies de pratique instrumentale de l'élite des musiciens.

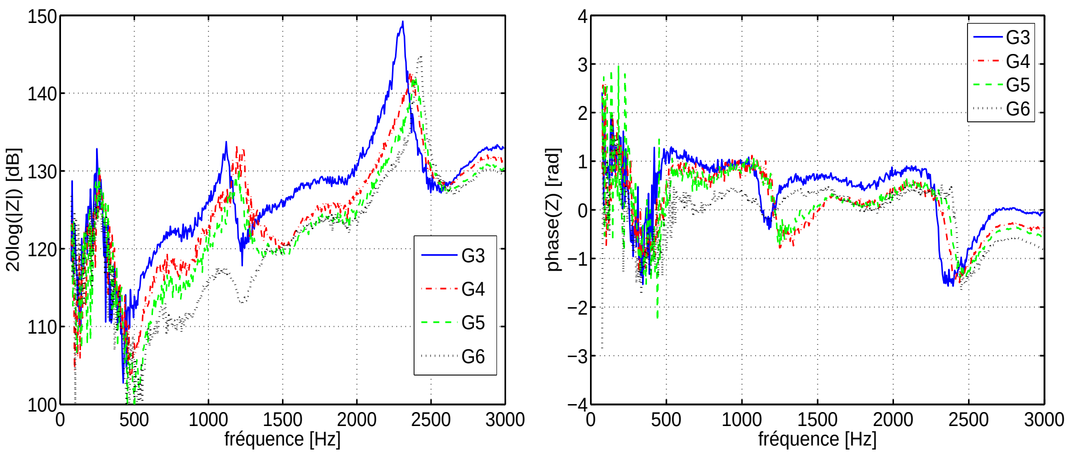


FIG. E.1 – Impédance (module et argument) du CV pour différents registres : du G3 au G6

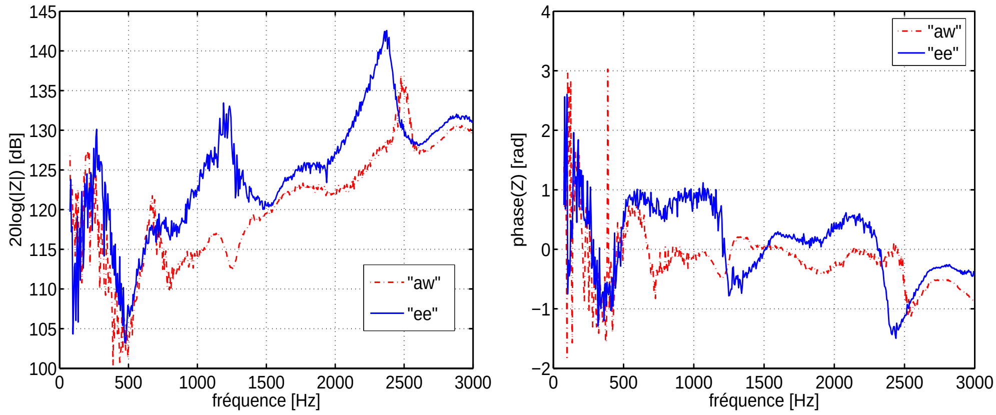


FIG. E.2 – Impédance (module et argument) du CV pour deux configurations "ee" et "aw", pour la note G4

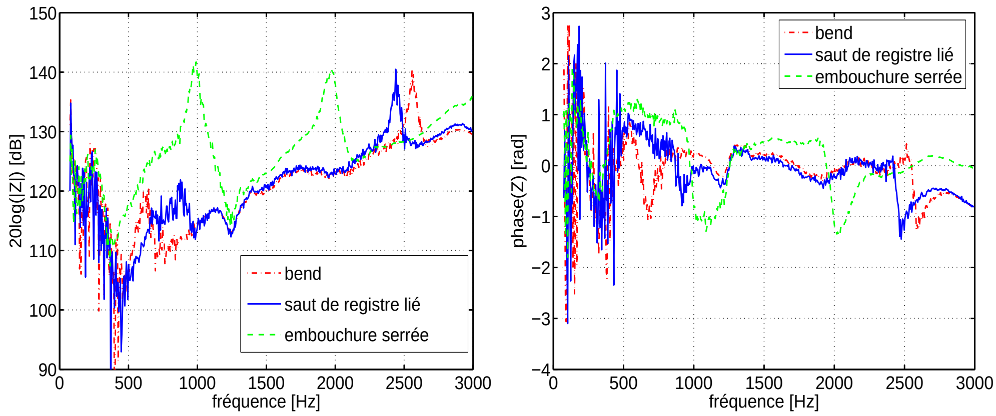


FIG. E.3 – Impédance (module et argument) du CV pour trois effets "spéciaux" : pitch bend, saut de registre lié (sans articulation) et embouchure serrée

E.2 Catherine McCorkill

Catherine McCorkill est renommée dans le monde australien de la musique de chambre. Elle est en effet clarinette solo dans l'Australian Chamber Orchestra et membre de l'Australia Ensemble, deux formations australiennes réputées, et participe de ce fait à de nombreux festivals de musique de chambre. Elle se produit par ailleurs en soliste avec la plupart des orchestres symphoniques australiens.

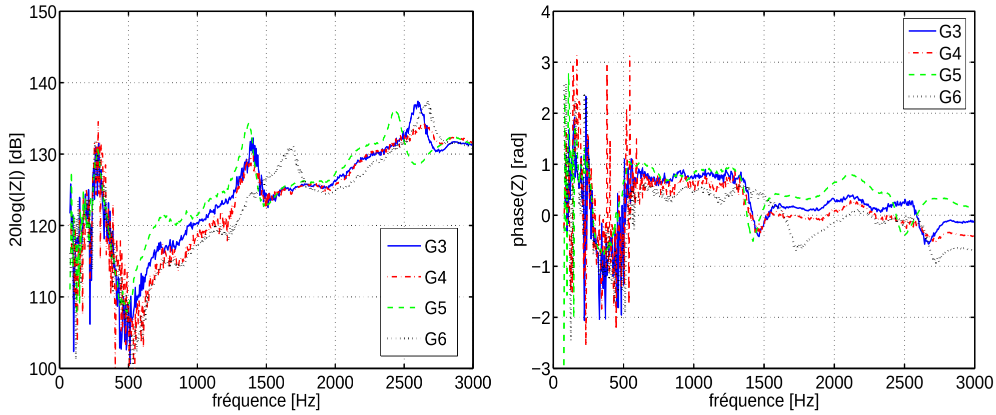


Fig. E.4 – Impédance (module et argument) du CV pour différents registres : du G3 au G6

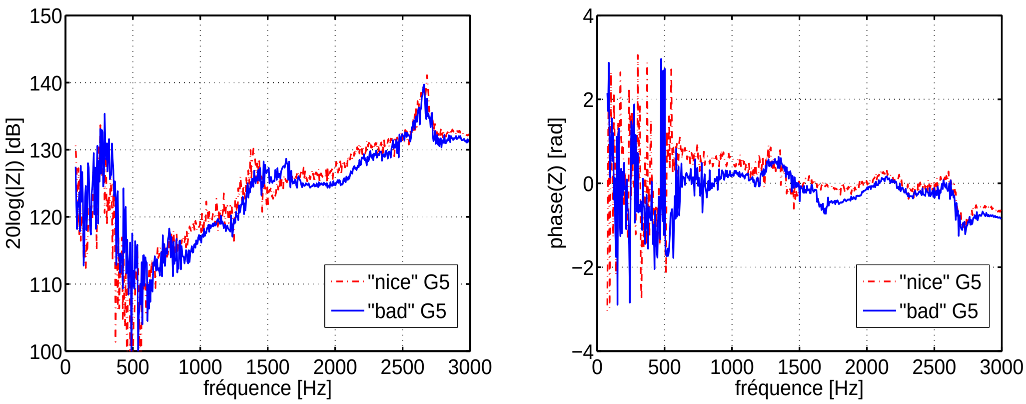


Fig. E.5 – Impédance (module et argument) du CV pour deux configurations permettant d'obtenir ou un “beau” son ou au contraire un mauvais son à éviter (note G5)

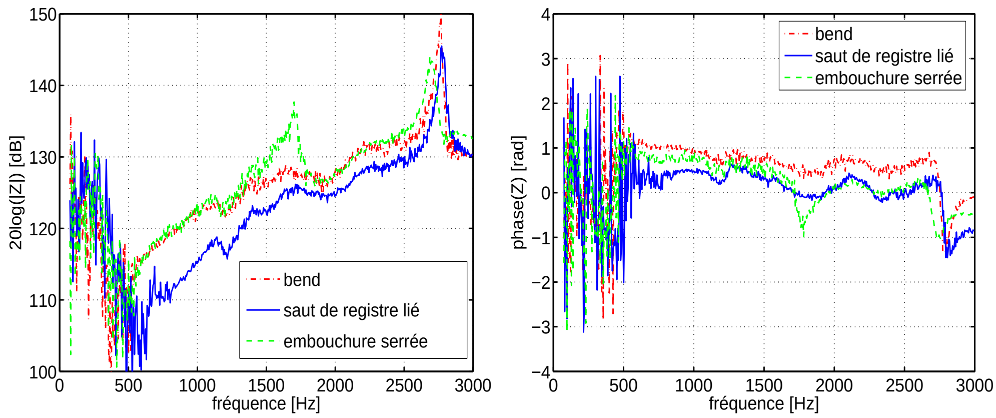


Fig. E.6 – Impédance (module et argument) du CV pour trois effets “spéciaux” : pitch bend, saut de registre lié (sans articulation) et embouchure serrée

E.3 Margery Smith

Margery Smith se produit aussi bien à la clarinette qu'au saxophone, tant en soliste qu'en orchestre ou en musique de chambre. Elle est professeur aux conservatoires de Newcastle et

de Sydney et s'intéresse particulièrement au développement de la pratique musicale dans les milieux défavorisés.

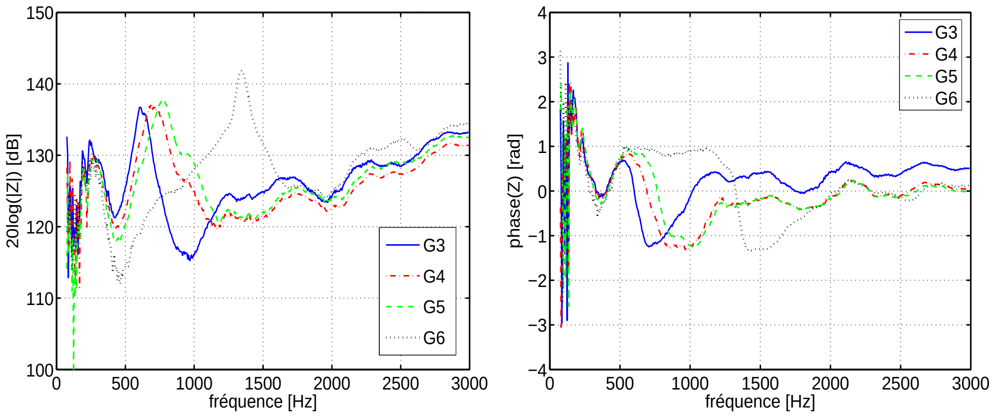


FIG. E.7 – Impédance (module et argument) du CV pour différents registres : du G3 au G6

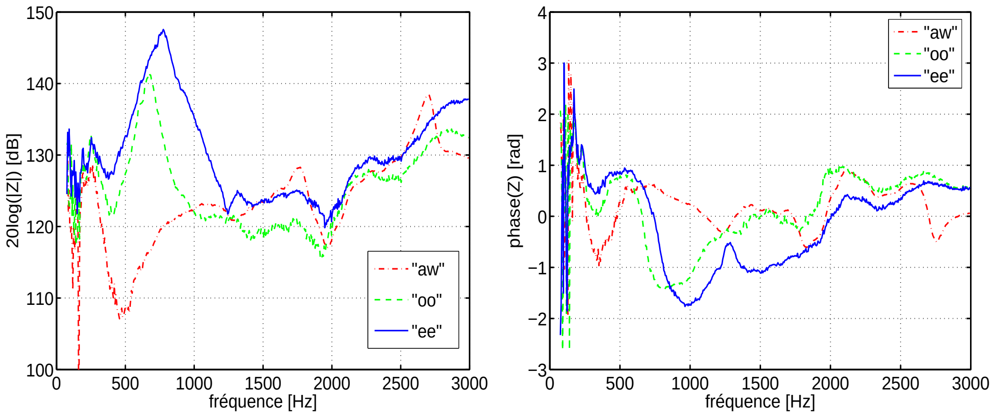


FIG. E.8 – Impédance (module et argument) du CV pour trois configurations "ee", "oo" et "aw" (note C5)

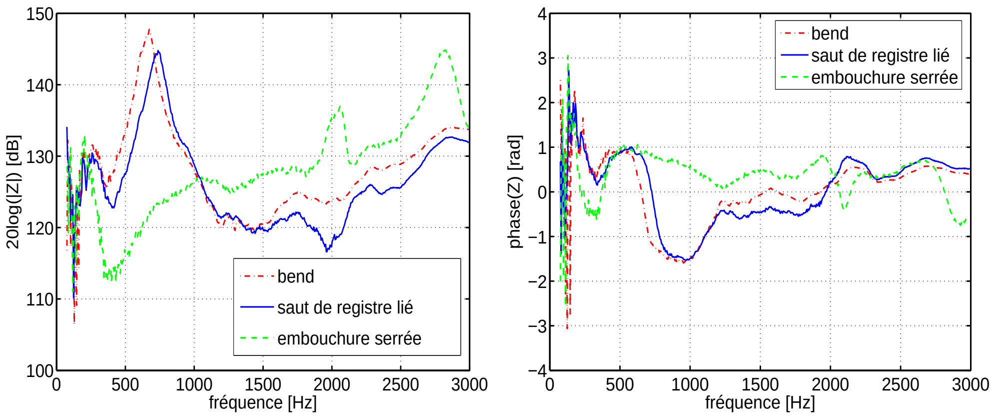


FIG. E.9 – Impédance (module et argument) du CV pour trois effets "spéciaux" : pitch bend, saut de registre lié (sans articulation) et embouchure serrée

E.4 Lawrence Dobell

En plus de sa place de clarinette solo au Sydney Symphony Orchestra, Lawrence Dobell se produit en tant que soliste avec les orchestres symphoniques de Melbourne et d'Adelaide. Il est par ailleurs également actif en musique de chambre, en tant que membre du Seymour Group et de l'Australian Wind Virtuosi.

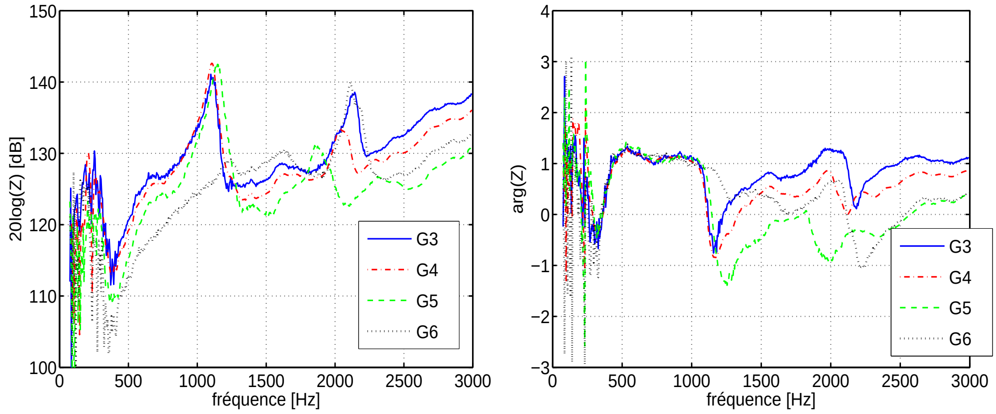


FIG. E.10 – Impédance (module et argument) du CV pour différents registres : du G3 au G6

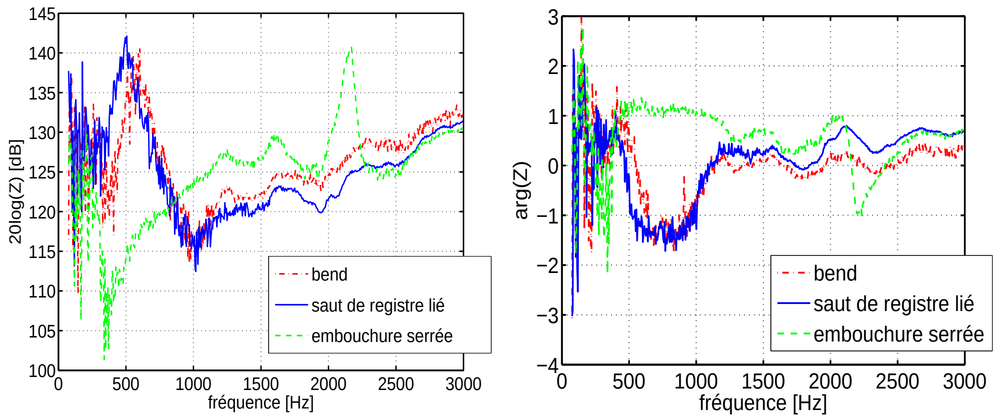


FIG. E.11 – Impédance (module et argument) du CV pour trois effets “spéciaux” : pitch bend, saut de registre lié (sans articulation) et embouchure serrée

E.5 Peter Jenkin

En tant qu'avocat de la musique contemporaine, Peter Jenkin a co-fondé le Sydney Alpha Ensemble et est membre du groupe innovant austraLYSIS. Il est actuellement première clarinette solo à l'Australian Opera and Ballet Orchestra et en cours d'édition d'un volume de courtes pièces écrites pour lui, à but pédagogique.

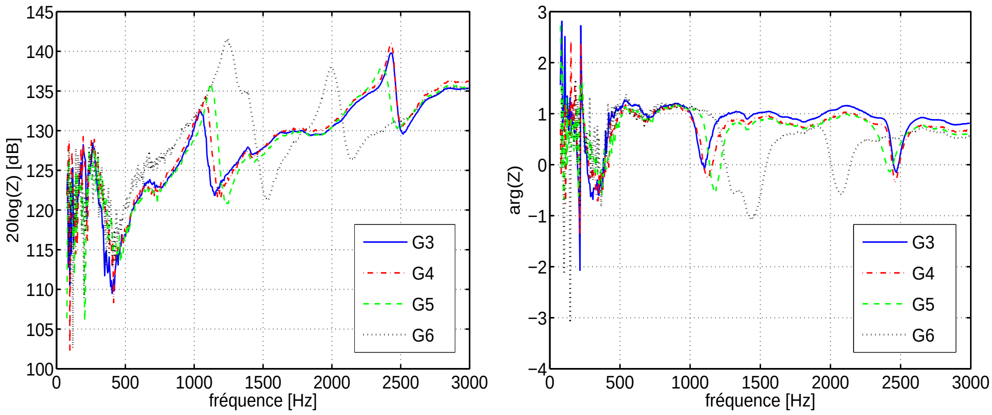


FIG. E.12 – Impédance (module et argument) du CV pour différents registres : du G3 au G6

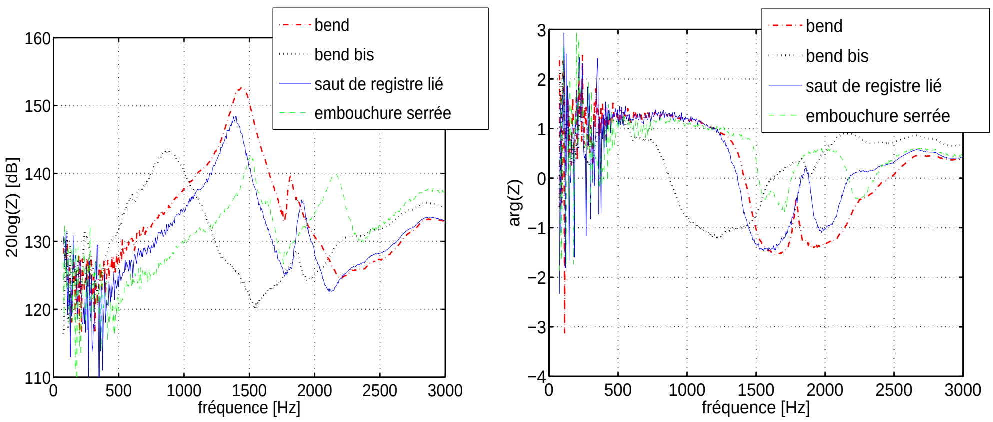


FIG. E.13 – Impédance (module et argument) du CV pour trois effets "spéciaux" : pitch bend (deux mesures assez différentes ont ici été consignées), saut de registre lié (sans articulation) et embouchure serrée

Annexe F

Complément expérimental

F.1 Le banc de mesure d'impédance de l'UNSW

Pour valider un banc de mesure d'impédance, il est nécessaire de comparer mesure et théorie pour différents tubes cylindriques. Nous n'en considérerons ici que deux : le premier est de longueur 400.3 mm et de diamètre 7.8 mm, le second de longueur 306 mm et de diamètre 15 mm. Pour le premier tube, la mesure a pu être effectuée en utilisant la pièce conçue pour la calibration puisque ce tube a le même diamètre que le tuyau de calibration. Pour le deuxième tube, un pièce spéciale a été réalisée pour maintenir, de manière étanche et reproductible, le tuyau large sur le bec de clarinette, dans lequel est inséré la tête de mesure. Il était important de vérifier la validité de la mesure sur un tuyau assez large puisque c'est le cas que nous rencontrerons lors des mesures du conduit vocal. C'est d'ailleurs ainsi que nous avions remarqué que nos précédents dispositifs n'étaient pas fiables, même si la mesure sur des tuyaux de diamètre 7.8 mm était correcte.

Pour le tube de diamètre 3.9 mm, la longueur corrective qui a été retranchée est de 9 mm ainsi que nous l'avons expliqué au paragraphe 2.2.2. Pour l'autre tube, il est nécessaire de tenir compte de la correction d'extrémité lorsque la tête de mesure débouche dans ce tuyau, plus large. Cette correction vaut, dans un modèle unidimensionnel au premier ordre, $0.85r = 3.3$ mm (r=3.9 mm) et nous l'avons ajoutée à la correction de 9 mm.

Le modèle de tube (de diamètre r et de longueur L) utilisé est celui que l'on peut trouver dans Fletcher et Rossing [34] :

$$Z = Z_0 \frac{\tan(\alpha L + j \tan(\omega L/v)}{1 + j \tanh(\alpha L) \tan(\omega L/v)} \tag{F.1}$$

avec

$$\alpha \approx \frac{3 \times 10^{-5} f^{1/2}}{r} \tag{F.2}$$

$$v \approx c \left[1 - \frac{1.65 \times 10^{-3}}{r f^{1/2}} \right] \tag{F.3}$$

$$Z_0 = \frac{\rho c}{\pi r^2} \tag{F.4}$$

La figure F.1 donne, pour chaque tube, la courbe d'impédance mesurée (et corrigée) et la courbe d'impédance théorique.

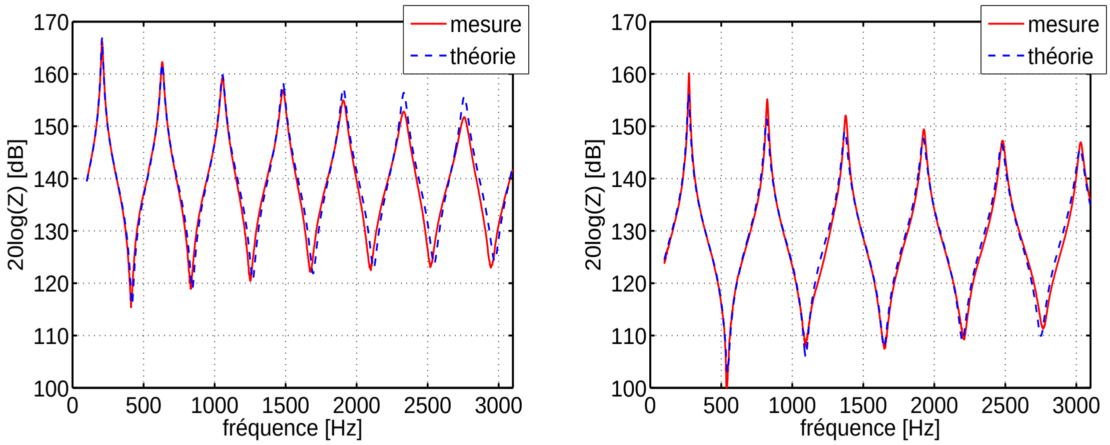


FIG. F.1 – Comparaison entre expérience et théorie pour deux tubes cylindriques : à gauche, de longueur 400.3 mm et de diamètre 7.9 mm, à droite de longueur 306 mm et de diamètre 15 mm.

Même si les minima sont décalés par rapport à la théorie (ce qui serait dû d'après Neville Fletcher au fait que la source est très petite en comparaison du tube où est placé le microphone, ce qui affecte l'impédance pour des flux importants, soit les minima d'impédance), on constate un bon accord pour les pics de résonance, qui sont ceux qui nous intéressent.

F.2 La bouche artificielle de l'IRCAM

F.2.1 Etalonnage des capteurs

Les capteurs Entran et Endevco ont été étalonnés en statique, au sein même de la bouche artificielle, en fermant le barillet par un bouchon. La pression était connue grâce au manomètre, placé soit dans la bouche, soit dans le barillet (figure F.2). Ceci permet aussi de vérifier leur linéarité.

Les régressions linéaires de la figure F.3 nous donnent :
- $P = -3.008U + 1.666$ pour le capteur Entran, avec un coefficient de corrélation $r = -0.932$
- $P = -6.428U + 0.001$ pour le capteur Endevco, avec un coefficient de corrélation $r = -0.999$

où P est la pression en kPa et U la tension délivrée par les capteurs en V.

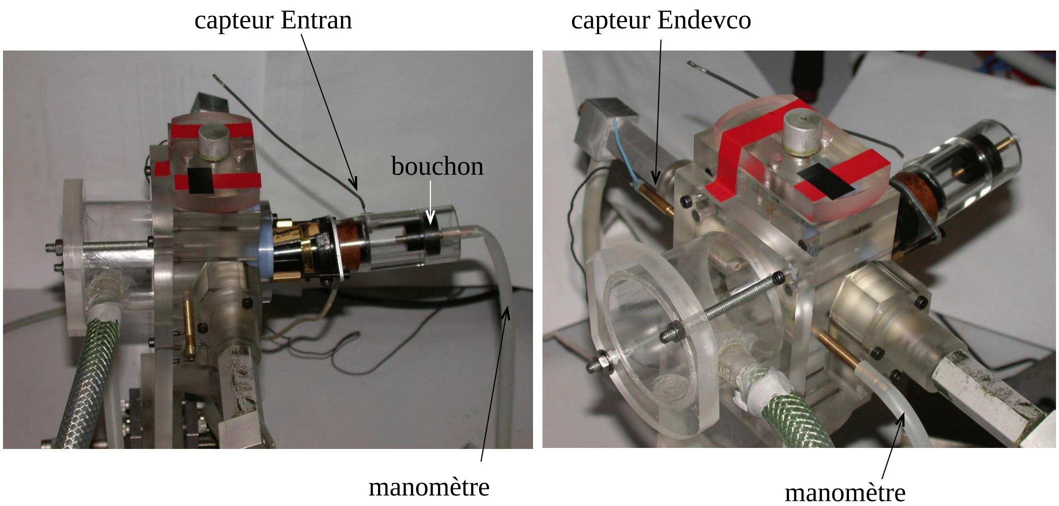


Fig. F.2 – Calibration des capteurs Entran à gauche et Endevco à droite

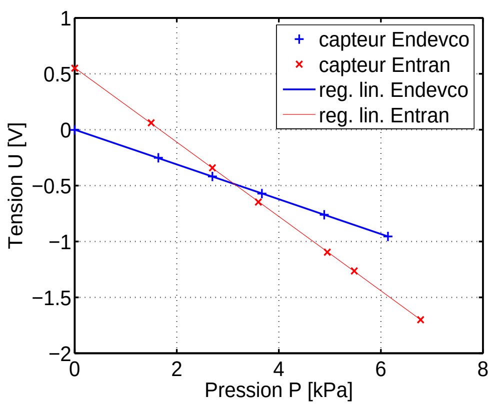


Fig. F.3 – Courbes d'étalonnage des capteurs : les points correspondent aux mesures, les droites aux régressions linéaires

F.2.2 Reproductibilité des mesures

La reproductibilité a été testée pour une configuration d'embouchure fixée : le tuyau cylindrique est resté en place afin d'être sûr de ne pas modifier l'embouchure qui est le point le plus délicat à reproduire dans ce dispositif. En revanche, le conduit respiratoire artificiel a été démonté intégralement puis remonté. Deux séries de mesures ont ainsi été réalisées, "avant" et "après", pour des pressions lues au manomètre identiques. La figure F.4 représente le résultat pour une pression statique dans la bouche de 2.86 kPa.

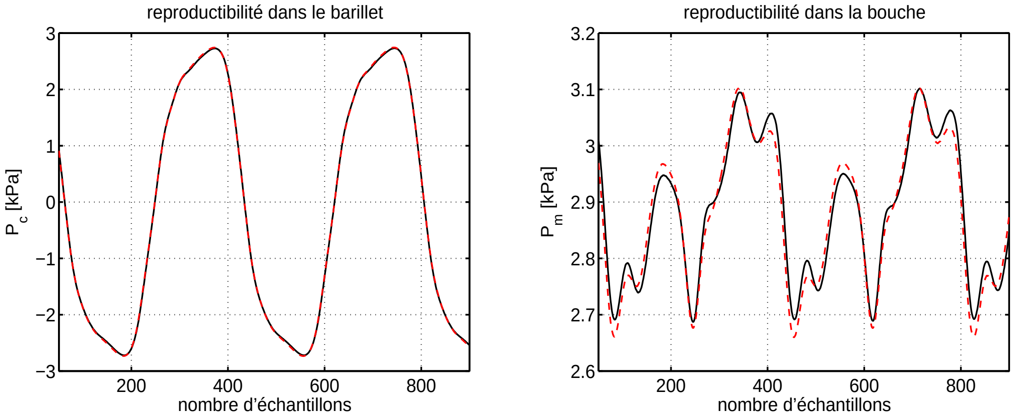


FIG. F.4 – Reproductibilité des signaux de pression dans la bouche et dans le barillet après démontage et remontage du conduit respiratoire

Annexe G

Au sujet de la clarinette

G.1 Glossaire

La notation utilisée dans cette thèse pour désigner les notes est la notation américaine : A4 correspond au La à 440 Hz. De plus, la clarinette étant un instrument transpositeur, nous nous réfèrerons aux notes écrites (les notes réellement jouées étant plus basses d'un ton).

La figure G.1 permet de visualiser, sur le cas particulier de la note G5, comment fonctionnent les clés d'une clarinette.

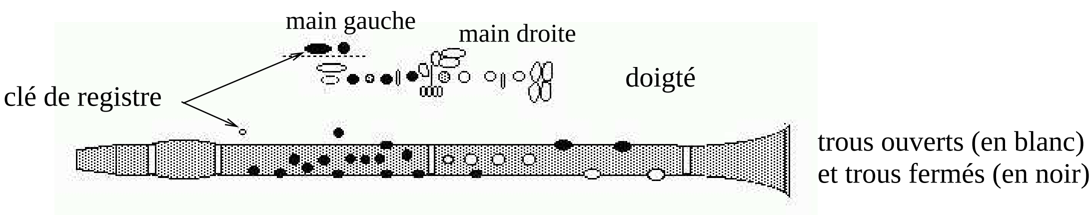


Fig. G.1 – Doigté de la clarinette pour la note écrite G5 et fermeture des trous correspondants

Les trois registres de la clarinette (cf figure G.2) :

1. Le chalumeau (ou registre grave) couvre du Mi 3 au Si bémol 4 (en notation écrite)
2. Les mêmes doigtés, avec la clé de registre ouverte, donnent les notes du Si 4 au Do 6, ce qui correspond au registre de clairon (ou registre aigu)
3. Le soulèvement du premier doigt de la main gauche, en deuxième clé de registre, permet d'obtenir les notes au-dessus, à partir du Ré bémol 6, qui constituent le registre altissimo (ou registre suraigu).

Intonation : elle mesure le degré d'adéquation entre une note et une référence donnée (cette référence pouvant être par exemple une gamme chromatique tempérée ou une relation harmonique).

Harmoniques : leur numérotation se fait selon la terminologie française : l'harmonique 1 correspond au fondamental, de fréquence f_o, et donc l'harmonique i correspond au ième harmonique, de fréquence if_o.

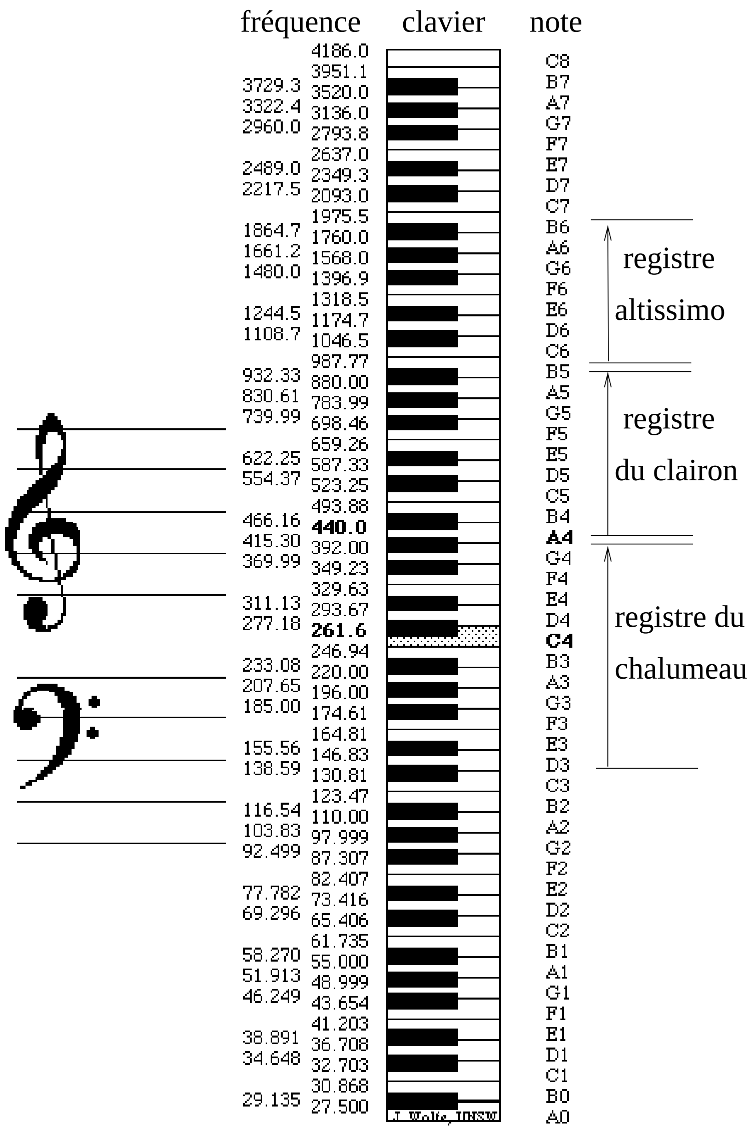


FIG. G.2 – Les registres de la clarinette (en notation réelle, soit un ton en-dessous de la notation écrite)

Multiphonique : émission simultanée de plusieurs notes, sans rapport harmonique entre elles.

Pitchbend : baisse de fréquence sans modification du doigté. C'est un glissando vers le bas.

Bugling : changement de registre sans modification du doigté (surtout dans l'aigu)

Buzz : nom donné à la note qui sort non pas sur le partiel 3 comme c'est prévu pour les notes du clairon (grâce à l'ouverture de la clé de registre) mais sur la fréquence fondamentale correspondante. Cette note n'est pas tout à fait une douzième en-dessous en raison de l'ouverture du trou de registre et correspond plutôt à une dixième.

Ambitus : plage des notes atteignables ou registre de jouabilité

G.2 Le clarinettiste Pierre-André Taillard

Comme ce clarinettiste intervient beaucoup dans cette thèse, et en particulier a rédigé la partie suivante, il me semble important d'exposer ici une courte biographie.

Après des études musicales à la Chaux-de-Fonds et à Bâle (H.R.Stalder, clarinette ; K.Linder et J.Wyttenbach, piano), Pierre-André Taillard se spécialise dans les clarinettes et chalumeaux historiques qui lui permettent de se produire en soliste, en musique de chambre ou dans l'orchestre avec des chefs comme R.Muti, F.Brüggen, Ph.Herreweghe et N.Harnoncourt. Il remporte quatre premiers prix lors de concours ; ses concerts le mènent dans de nombreux pays européens et asiatiques. Son enregistrement du concerto KV.622 de W.A. Mozart a été unanimement salué par la critique et celui du Grand Duo de Weber avec E. Torbianelli a été couronné de nombreuses distinctions (Diapason d'Or, 10 de Répertoire, deux fois nommé disque du mois). Il enseigne actuellement la clarinette historique dans les classes professionnelles de la Schola Cantorum Basiliensis, ainsi que la clarinette moderne au Conservatoire de La Chaux-de-Fonds. En tant que pianiste, il accompagne volontiers des chanteurs, comme L.Lootens ou Ph.Hüttenlocher.

Il est l'inventeur du système Claripatch (partie G.4) qui permet au clarinettiste de moduler à sa guise les caractéristiques élastiques et musicales de ses anches. Cette invention l'a amené à s'intéresser de plus près au domaine de l'acoustique de la clarinette.

G.3 Techniques de son allemande et française

Ce texte a donc été écrit, à ma demande, par Pierre-André Taillard.

La différence de construction entre la clarinette allemande et française (Boehm) est bien connue. Faisons abstraction des différences de perce et de doigtés et intéressons nous uniquement à l'anche et à la courbure de la table. L'anche allemande est plus étroite que son homologue française (environ 12 mm contre 13 mm). La coupe du biseau est plus courte, ce qui donne une anche plus raide. La courbure de la table du bec prend sa naissance plus en arrière (typiquement 25 à 30 mm, contre 20 à 25 mm), l'ouverture est plus petite (typiquement 0.8 à 1.0 mm contre 1.0 à 1.25 mm) et la table est moins arquée. Il convient de mentionner également le système autrichien, encore plus allemand : tables très longues typiquement de 30 à 35 mm pour une ouverture de 0.69 à 0.78 mm.

La technique d'embouchure optimale pour chacun des systèmes est assez différente. Voici une comparaison de ces deux techniques basée sur mon expérience personnelle avec ces deux types d'instruments, sur mes observations et discussions avec différents collègues et étudiants, ainsi que sur mon expérience avec les instruments historiques.

La technique de son utilisée par chaque clarinettiste s'inscrit grosso modo dans un espace délimité par deux pôles que je nommerai allemand et français ; chaque interprète exploite généralement une portion plus ou moins étendue de cet espace suivant son expérience et ses intentions musicales, mais on observe que la majorité des instrumentistes préfèrent adopter une technique plus allemande avec un instrument allemand et plus française pour un

instrument français (en fait, c'est uniquement le bec et l'anche qui déterminent la technique à adopter ; je joue personnellement assez volontiers la clarinette Boehm avec un bec allemand et un baril d'adaptation). Notons que les différences entre ces deux écoles se sont assez nettement accrues durant ce dernier demi siècle, avec l'apparition de becs français de plus en plus ouverts. Cette tendance commence à s'inverser depuis quelques années. Le bec légendaire 5RV n'est actuellement plus très utilisé par les clarinettistes professionnels, car ils n'aiment pas (ou ne maîtrisent pas) la technique nettement plus allemande qu'il demande.

J'aimerais cependant bien insister sur le fait que les deux qualificatifs sont purement utilitaires et ne décrivent surtout pas un idéal à atteindre, bien au contraire. Une technique française pure est tout aussi absurde qu'une technique allemande pure, comme elle prive le clarinettiste de nombreuses ressources musicales.

G.3.1 La technique allemande

L'instrumentiste prend beaucoup de bec et place ses lèvres près de la naissance de la table. L'anche - placée sur la longue table typique du système allemand - peut être qualifiée d'assez faible (même si elle est en fait très nettement plus raide qu'une anche française placée sur le même bec). Le clarinettiste exerce une pression de lèvre très modérée sur l'anche et utilise principalement la pression d'air pour la courber et l'amener à osciller. Le timbre est contrôlé en grande partie par la pression d'air et par la configuration du conduit vocal. Celui-ci doit être très dilaté si on veut repousser au maximum le seuil d'extinction et obtenir une sonorité ample et ronde ; le placement de la lèvre très en arrière et sa pression très modeste sur l'anche a également pour but de faire reculer ce seuil, en maintenant une ouverture au repos la plus grande possible. L'anche a donc une partie libre (sans contact avec la lèvre) qui est assez longue, ce qui rend le son riche en harmoniques aigus. L'air pénètre latéralement dans l'instrument dans une proportion assez importante. Les oscillations rapides du pont de l'anche lors du choc avec la table sont donc modulées de manière assez importante dans la perce de l'instrument. La dilatation du conduit vocal tend à arrondir la sonorité qui sans cela serait assez pointue, maigre et nasale (la perce plus large de l'instrument allemand va également dans ce sens). La flexion de l'anche est répartie sur une grande longueur et son amplitude est assez faible, ce qui favorise un comportement stable de l'anche dans la durée et une faible usure. L'anche doit être bien humidifiée (donc bien lourde) et demande généralement quelques minutes d'assouplissement pour produire un son de qualité. L'absence presque complète de pression sur l'anche la rend pratiquement inutilisable lorsqu'elle devient un peu faible. La sonorité est bien stable du point de vue de l'intonation (comme la longueur vibrante de l'anche est pratiquement constante), mais demande un instrument très juste, puisqu'une note trop basse est quasi impossible à corriger sans ruiner la sonorité (et les propriétés élastiques de l'anche). L'essentiel du contrôle de l'intonation est géré par le conduit vocal. Le jeu de l'instrument est très proche du chant et le contrôle de la nuance est très aisé (à part le pianissimo qui peut être difficile à réaliser sans bruit de turbulence si l'anche est légèrement asymétrique). Toute erreur dans le placement du conduit vocal ou dans le soutien de la pression d'air s'entend immédiatement (par exemple en

situation de stress), alors que le contrôle de la lèvre inférieure joue un rôle plus secondaire [1]. Le fortissimo est déterminé par la raideur de l'anche et l'instrumentiste n'a aucune possibilité (à part la dilatation du conduit vocal) pour le rendre plus puissant.

G.3.2 La technique française

L'anche utilisée est assez raide (par rapport à la table utilisée ; le seuil d'extinction en technique allemande serait pratiquement impossible humainement à atteindre, pour les anches utilisées par les professionnels). L'instrumentiste doit donc comprimer assez fortement l'anche sur la table avec la lèvre et positionner cette dernière nettement après la naissance de la table pour augmenter le bras de levier. En fait, la majorité du contrôle de la nuance et de la sonorité se fait par l'intermédiaire de cette pression exercée sur l'anche (en particulier chez les débutants). La richesse harmonique est obtenue par une courbure assez prononcée du dernier centimètre de la table (typique sur le bec 5RV lyre, par exemple), par une pointe d'anche assez fine et par une longueur d'anche vibrante assez petite. Sans vouloir nier son importance, on doit remarquer que la configuration du conduit vocal joue un rôle moins décisif qu'en technique allemande ; les grands volumes de cette technique sont impossibles à atteindre, car l'instrumentiste prend moins de bec. L'expert a toutefois la possibilité d'agrandir son conduit vocal en renonçant à comprimer l'anche avec ses dents et à maintenir la pression sur l'anche avec sa seule musculature labiale. Il pourra alors abaisser sa mâchoire pour augmenter le volume buccal (autre possibilité : coller une pastille épaisse sur la mentonnière). L'avantage de cette technique est de permettre un contrôle très fin de la sonorité par l'embouchure (qui doit être bien musclée et très stable), robuste également en situation de stress, mais l'intonation est assez variable en raison des changements de longueur vibrante de l'anche. Elle est très haute dans le pianissimo et s'abaisse passablement dans le fortissimo, mais celui-ci peut être extrêmement puissant (en faisant abstraction du défaut d'intonation). Notons que la raideur et la viscosité de la lèvre jouent un rôle important en venant s'ajouter à celles de l'anche (en plus de la masse). L'anche est sollicitée fortement sur une faible longueur, comme elle doit épouser un rayon de courbure assez petit. La pression constante exercée par la lèvre tend également à l'affaiblir assez rapidement. L'instrumentiste doit donc choisir une anche qui peut être très désagréable à jouer lorsqu'elle est neuve pour augmenter sa durée d'utilisation optimale. Les débutants ont tendance à utiliser une technique française caricaturale alors que l'expert se dirigera un peu du côté allemand pour augmenter la stabilité de sa sonorité et la durabilité de son matériel. Une certaine pression des lèvres reste cependant nécessaire pour obtenir un timbre de qualité avec un bec français. Remarquons néanmoins qu'il existe un certain nombre de clarinettistes excellents qui utilise une technique très française avec des anches très raides et des becs très ouverts (au prix d'une consommation d'anches assez élevée).

[1] Il est important d'observer que la pression de lèvre a un effet bien réel sur les différents seuils et peut les modifier très radicalement. L'intonation est cependant moins affectée. C'est donc bien parce qu'il est préférable de s'abstenir de presser sur l'anche (à part un peu dans l'aigu) que la lèvre inférieure joue un rôle plus secondaire.

G.4 Le système Claripatch

Le système Claripatch [14], conçu et mis au point par Pierre-André Taillard, est un système de languettes en plastique aluminisé qui est disponible en 8 formes et épaisseurs différentes. Les languettes se placent entre l'anche et le bec (figure G.3).

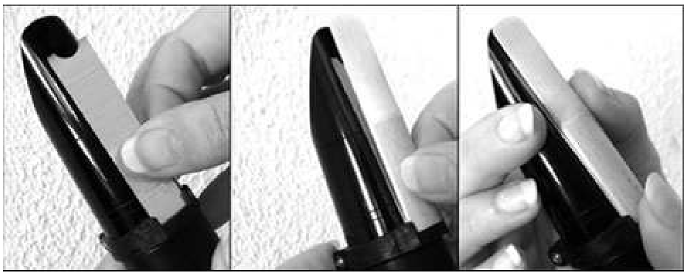


FIG. G.3 – Mise en place d'une languette Claripatch sous l'anche

Chaque Claripatch a été conçu pour résoudre un problème spécifique de l'anche de la clarinette. Le système permet en particulier d'améliorer la qualité d'une
- anche neuve ou vieillissante
- anche trop forte ou trop faible
- anche trop claire ou trop molle
- anche qui est trop mouillée ou qui a perdu son soutien.

Je ne décrirai ici que le patch N (comme Noblesse) du commerce et le patch Y, un prototype réalisé exprès par Taillard pour l'anche plastifiée Rico, force 3. Voici comment est décrit le patch N dans le manuel d'instructions de Claripatch : il augmente légèrement la résistance de l'anche, redonne une certaine noblesse à une anche vieillissante, améliore le pianissimo et donne un staccato net et facile. L'anche tolère une pression plus élevée de lèvres. En ce qui concerne le patch Y, il stabilise la longueur vibrante de l'anche. Ce patch a été conçu au départ pour tester la symétrie de l'anche autour de 15 à 20 mm puis il s'est avéré qu'il était possible de l'utiliser aussi musicalement, comme il donne un bon soutien à l'anche, particulièrement avec les anches faibles, sans stabilité et "tonitruantes".

La figure G.4 montre comment la table est modifiée par ces patchs.

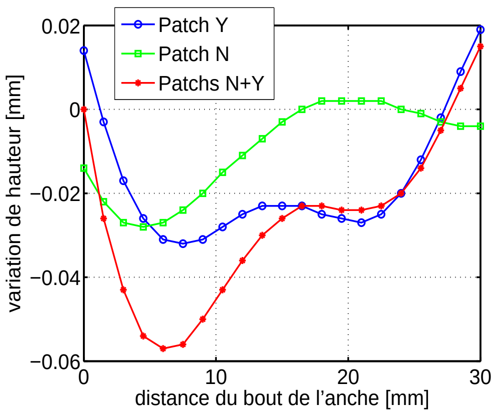


FIG. G.4 – Modification de la hauteur de la table par les patchs Y, N et la combinaison des deux en fonction de la distance par rapport l'extrémité fine de l'anche.

Annexe H

Conséquences pédagogiques de l'étude

Suite à la venue de Pierre-André Taillard à l'IRCAM pour le réglage de la bouche artificielle ainsi que la réalisation de quelques expériences, et suite à de nombreuses discussions par rapport à mon travail, Pierre-André a eu un déclic par rapport à la théorie du son-guide, nom utilisé pour désigner le signal produit par la glotte puis filtré par le conduit vocal et la clarinette, juste avant le seuil d'oscillation. Celle-ci est susceptible de prendre à l'avenir une certaine importance en pédagogie ; Pierre-André l'utilise depuis plus de dix ans sans trop comprendre la raison expliquant son efficacité. Il avait baptisé cet exercice "les sons brouillards". Juste après sa venue, il a pu refaire l'expérience avec une très jeune élève qui a un peu plus d'un an de clarinette, jouant un instrument en ut adapté à sa petite taille.

Le plus simple est de laisser Pierre-André parler lui-même, dans un courriel du 20 Octobre 2004 :

> Nous sommes en train d'aborder le clairon jusqu'à G5. Je lui ai fait entendre le son-guide nécessaire pour produire le E6. Il lui a fallu en gros une minute pour pouvoir le produire (la seule demande "souffle plus fort sans rien changer" a suffi, une fois le son-guide établi). J'ai tenté la même expérience avec le A6 et elle a pu le réaliser avec facilité. Cela représente donc pour l'élève un gain de temps énorme (temps que l'on peut investir alors dans le domaine artistique). Avec les étudiants professionnels, j'ai essayé de produire tous les harmoniques du 8 au 3, y compris les harmoniques pairs. Après avoir démontré le son-guide à produire, ils y sont sans peine parvenus. J'ai renouvelé l'expérience avec différentes qualités expressives de sonorité ; celles-ci peuvent se révéler fort délicates à réaliser sur commande. D'autres difficultés comme les multiphoniques, le glissando ou les attaques pianissimo dans le suraigu ont été également passées au crible. Le succès de la méthode s'est confirmé. Les explications à donner aux élèves sont très succinctes, objectives et facilement mémorisées, contrairement à celles que l'on entend habituellement en cours de clarinette.

Suite à ces réflexions ainsi qu'aux conclusions sur l'importance de l'aérodynamique du jet résultant de l'étude du chapitre 4, il a réalisé plusieurs expérimentations sur son propre CV qui, en sus de toutes ses observations pédagogiques, l'ont conduit aux conclusions synthétisées

dans le texte suivant, intégralement écrit par lui le 7 novembre 2004.

Voici un petit résumé de technique instrumentale synthétisant certaines réflexions suscitées par le présent travail de thèse, ainsi que des centaines d'observations tirées de ma pratique de musicien et d'enseignant.

Partons de la cage thoracique et de l'abdomen. Tout comme les autres musiciens à vent et les chanteurs, nous portons une attention particulière à notre diaphragme. Il est bien connu que ce dernier se comporte de manière purement passive à l'expiration, étant le plus important muscle inspirateur. Nous cherchons à l'étirer comme une peau de tambour sur les bords en augmentant le diamètre du tronc au niveau de l'épigastre et des côtes flottantes pour l'empêcher de retrouver trop vite sa forme de dôme flasque. Nous formons en quelque sorte un résonateur à très basse fréquence dont il faudrait étudier le rôle dans la formation du vibrato (un harmonique ?). Le maintien assez rigide en inspiration de la cage thoracique en évitant une descente du sternum doit également jouer un rôle, ainsi que la détente des muscles du cou sur la texture du larynx et du pharynx. Cette configuration permet aussi une modification agile et précise de la pression d'air dans les poumons. On remarquera que la position du larynx est susceptible de varier verticalement suivant la différence de pression entre les poumons et la bouche. Les musiciens accordent une grande importance à la posture, en particulier au maintien du cou et de la tête. Je pense que cela vise à stabiliser le larynx en position basse tout en augmentant au maximum la distance entre la glotte et le palais mou, arrondi comme dans un début de bâillement pour faciliter la déflexion du jet. Le mécanisme du "soutien", bien connu de tous les musiciens à vent, peut à mon avis se dissocier en trois principes distincts : la résonance basse fréquence que nous venons d'évoquer, le rôle de détendeur de la glotte pour faciliter le maintien d'une pression dans la bouche plus ou moins constante ainsi que le contrôle de la vitesse et de la forme du jet expulsé par la glotte. La glotte constitue en quelque sorte une buse souple dont la forme détermine celle du jet qu'il produit. Lors d'un changement de registre, on observe un mouvement du cartilage thyroïde (à mon avis causé par une rotation des cartilages aryténoïdes pour passer de la configuration en "triangle du chuchotement" à une glotte mince et étirée ; une action du muscle crico-thyroïdien n'est pas exclue). D'autre part, le jet est susceptible de modifier rétroactivement la forme de la buse souple (autorégulation).

Ouvrons une parenthèse pour essayer d'imaginer les modalités de la circulation de l'air dans le conduit vocal : Partons d'une situation "statique" où on place une anche coupée d'un bon centimètre après avoir modifié son angle d'attaque à l'aide d'une cale en forme de coin pour obtenir une fente entre l'anche et le bec comparable à celle d'une anche normale fléchie par la pression des lèvres (j'ai utilisé trois Claripatch L empilés l'un sur l'autre à la base de la table du bec dans mes expériences). La colonne d'air de la clarinette sera donc incapable d'entrer en oscillation (humainement parlant). Notre jet sortant de la glotte se comporte comme une pompe à vide, entraînant un appel d'air. Si le conduit vocal est élargi, l'air aura plus de facilité à se frayer un passage en sens inverse ; il pourra circuler plus lentement et causera moins de frictions. Les pertes aérodynamiques locales sont diminuées. Une augmentation de la vitesse du jet va entraver cette circulation, de même qu'une diminution de section de la "tuyère". Il y a donc une limite à partir de laquelle le jet suit les parois du conduit en en modifiant sa forme, à cause de la diminution de pression sur les parois et de la souplesse du conduit. La forme et la portée du jet résultant se modifient très notablement. Dans le jeu de la clarinette, le jet

doit effectuer une double torsion à angle droit dans le sens vertical et dans le sens horizontal avant de pénétrer dans la bouche pour s'orienter en direction de la fente entre le bec et l'anche. Imaginons comment notre "courant d'air" va de déplacer dans la bouche lorsque le jet est lent. Il va suivre la langue, se scinder en deux, passer sur les côtés au niveau de la canine et des prémolaires, descendre sous la langue, remonter le long des incisives, contourner la lèvre, longer l'anche puis effectuer une volte-face à 180 degrés en décrivant une petite boucle de vena contracta avant de pénétrer dans l'instrument. De l'autre côté, l'air va longer le palais et les incisives, descendre le long de la "mentonnière" du bec puis effectuer une volte face semblable (Hirschberg et coll. ont déjà démontré ce principe dans une étude [49]). L'air va également entrer latéralement dans l'instrument sous les côtés de l'anche avec un angle à déterminer et dépendant de la vitesse. En augmentant la vitesse du jet ou en changeant la configuration du conduit vocal, l'air pourra être obligé à circuler en boucle. Dans le jet d'air sortant de la glotte, nous avons une formation de petits tourbillons aléatoires créant dans le temps, à un endroit donné, une succession aléatoire de modifications de pression, ces modifications étant d'autant plus aléatoires que l'on s'éloigne de la buse. En augmentant la vitesse du jet, nous changeons la répartition sur la bande de fréquence de ces petites saccades successives. Que se passe-t-il lorsque la colonne d'air se met en vibration dans le conduit vocal (excitée par celle nettement plus efficace de l'instrument) ? J'imagine qu'une rétroaction sur la forme du jet va se mettre en place et obliger les petites saccades aléatoires à se synchroniser plus ou moins sur les oscillations de la colonne d'air (et donc à retarder ou à empêcher la dégénération progressive du jet). Cette réorganisation commence d'ailleurs à la base de la glotte, en raison de la petite différence de pression causée par les oscillations de la colonne d'air (en grande partie découplée par l'anche). La fréquence des saccades va donc progressivement migrer en direction des pics de résonance du système entier (clarinette + conduit vocal). Le jet va pouvoir maintenir sa trajectoire ondulante plus longtemps et conserver son énergie cinétique. Les contours de la bouche doivent probablement y participer, y compris les rides de surface. Les oscillations de l'anche vont modifier la forme du jet circulant sur sa surface (et vice versa). Nous avons en quelque sorte à la fois une corde d'air tournoyant en boucle, excitée par une anche oscillant sur place (et par des saccades plus ou moins aléatoires du jet) et une excitation de l'anche et de l'extrémité du jet (avant son entrée dans la boucle) par un archet d'air circulaire.

Ces spéculations sur les modalités de circulation de l'air dans le conduit vocal me conduisent à définir trois configurations caractéristiques dans le jeu de la clarinette, représentées à la figure H.1. Bien entendu, ces configurations ne représentent que des pôles entre lesquels le clarinettiste choisit la solution la plus adaptée à ses besoins musicaux. La configuration large en /æ/ laisse passer en gros toute la gamme de fréquences (en particulier les aigus) et incite la colonne d'air à produire soit un son fondamental très riche, soit un mode supérieur (ce que nous avons observé au seuil d'oscillation sur la bouche artificielle). Nous renforçons cet effet avec un jet compact de la glotte (en forme de triangle), dirigé essentiellement vers la langue. Une langue latéralement étroite au niveau des canines et des prémolaires permet une bonne séparation des courants aller et retour. La configuration large du conduit incite l'air non consommé par l'instrument à retourner majoritairement à la base du jet de la glotte pour entretenir cette circulation rapide, bruyante, excitant les oscillations (le sifflement) des bords de l'anche. Cette vitesse permet aussi d'augmenter la portance positive éloignant l'anche de la table et repousser (indéfiniment ?) le seuil d'extinction, tout en refoulant la lèvre ; ceci augmente la longueur

vibrante de l'anche et fait baisser l'intonation. Le son produit par cette configuration est très bruité autour du seuil d'oscillation et ne s'utilise guère dans le piano. Dans le suraigu, le bruit de souffle est maintenu au minimum nécessaire pour soutenir l'oscillation. Cette configuration s'utilise principalement pour produire un son riche et puissant dans le grave (avec une pression de lèvre et une pression d'air dans la bouche plus élevée) ou pour stimuler la colonne d'air à changer de régime pour émettre l'aigu et le suraigu (où la sonorité peut toutefois s'avérer très perçante et d'intonation un peu basse). Le timbre désagréable du suraigu peut être tempéré par une langue latéralement large pour diminuer l'appel d'air en direction de l'anche.

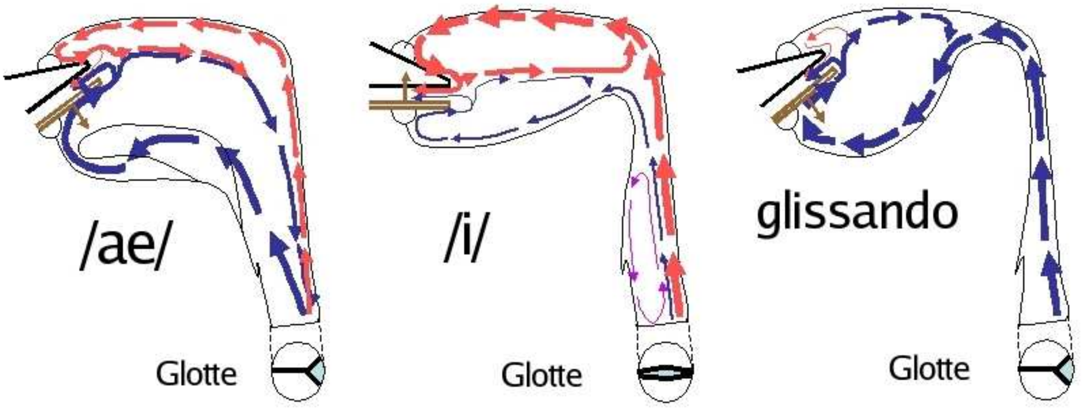


Fig. H.1 – Représentation schématique des trois configurations de conduit vocal illustrant la circulation de l'air supposée par Pierre-André Taillard. En bleu : air circulant sur la langue en direction de l'anche, en rouge, air circulant vers le palais en direction de la "mentonnière" du bec. En brun, la portance de l'anche due à une inégalité de vitesse de l'air balayant ses deux surfaces. Dans la configuration en /æ/, la langue laisse passer latéralement le jet d'air par dessous, contrairement aux deux autres configurations où seul le dessus de la langue est représenté. Pour le /i/, l'angle d'embouchure a été modifié pour accentuer encore la différence de circulation. Dans le cercle, une vue schématique de la glotte supposée typique de chaque configuration.

L'autre pôle principal est représenté par une configuration en /i/ (le /i/ symbolise toutes les positions hautes du milieu de langue). Il permet d'obtenir des sons dolce, bien soutenus et très purs. Nous adoptons en général une telle configuration dans le piano. En fait, la caractéristique principale est une langue en retrait dans le pharynx (vers le "k") : c'est le phénomène de la voce coperta typique de la technique de chant : conduit vocal en "ô" ou en "ou" pour diriger l'air vers le palais tout en conservant un bon volume dans la gorge ; la pression dans la bouche peut augmenter de manière assez importante. En pratiquant l'exercice la bouche ouverte (sans clarinette) on sent nettement au palais la sensation de froid causé par le jet d'air émis par la glotte. Un accolement plus ferme des cordes vocales demande une pression de soutien plus importante pour forcer la glotte et fait monter le bruit du souffle dans l'aigu (très silencieux en comparaison du chuintement habituellement utilisé dans la configuration /æ/ ; on peut moduler à volonté les résonances du conduit vocal pour produire une note d'une hauteur bien

identifiable). La configuration en /i/ opère une sélection assez étroite des fréquences favorisées. Dans le grave, il faut éviter de cibler un harmonique particulier (comme le 2 ou le 3), sous peine d'établir des interférences désagréables et contreproductives. Dans le haut du clairon ou dans le suraigu, cette configuration produit un timbre assez pauvre et demande un ajustement très précis, ce qui fait que nous préférons abaisser un peu l'arrière-langue du côté du /æ/ pour une émission aisée avec une sonorité plus riche. Cette configuration renforce la portance négative de l'anche, comme la majorité de l'air entrant dans l'instrument provient du palais. Elle permet d'augmenter la pression d'air dans la bouche sans trop augmenter le flux d'air pénétrant dans la fente ; le seuil d'oscillation est déplacé pour être amené aussi proche qu'on le désire du seuil d'extinction. C'est probablement l'explication du pianissimo très pur et juste utilisé par les professionnels. D'une manière générale, cette configuration fait monter modérément l'intonation (une forte pression des lèvres sur l'anche produit une hausse d'intonation bien plus marquée) et ne peut pas s'utiliser au-delà du mezzo-forte, comme le seuil de saturation est plus vite atteint.

La troisième configuration principale (glissando ou recherche d'harmonique aigu) est une variante de la configuration en /i/ : peu de pression des lèvres, gorge très étroite, constriction pharyngée ou palatale importante, cordes vocales ouvertes en triangle (d'où une pression dans la bouche assez basse malgré un débit important) et milieu de langue "en toboggan", étanche latéralement. L'air est obligé de se déplacer au centre de la langue, happe par appel d'air une partie de celui qui survole l'anche et le contraint à circuler en boucle. Une mince lame peut se détacher périodiquement du rapide tourbillon et pénétrer dans la fente après avoir effectué une boucle de vena contracta agrandie. Nous avons la configuration typique d'un résonateur de Helmholtz, à ce qu'il me semble. Elle est assez “gourmande” en énergie, mais elle nous permet de faire “ mentir” l'acoustique de la clarinette et d'effectuer certaines corrections d'intonation.

Nous voyons qu'un instrumentiste expérimenté peut contrôler dans une certaine mesure la quantité d'air qu'il dirige vers la langue et celle qu'il dirige vers le palais. Il peut donc modifier à sa guise la portance de l'anche, ce qui s'avère très utile pour passer instantanément de pp à ff par une simple descente de la langue en gardant la même pression dans la bouche. La modification de l'angle d'embouchure permet de démontrer également le même phénomène (bien qu'il soit difficile de maintenir toujours une embouchure à peu près équivalente). Voilà pourquoi les clarinettistes allemands adoptent un angle d'attaque moins prononcé que leurs collègues jouant la clarinette Boehm.

Voici donc en résumé les conclusions de mes observations pédagogiques et de mes expérimentations sur mon propre conduit vocal :

Les différentes configuration de conduit vocal, de larynx et d'angle d'embouchure adoptées par les clarinettistes visent principalement à modifier les caractéristiques (vitesse, pression et direction) de la circulation de l'air dans la bouche en créant plusieurs bouclages, tout en en modifiant leurs dimensions. Les configurations avec langue en retrait dirigent l'air majoritairement vers le palais. Les configurations avec arrière langue dégagée dirigent l'air majoritairement vers les côtés de la langue, ce qui guide l'air vers l'anche ; une modification de la forme de la glotte renforce cette orientation. Une glotte mince et étirée apporte une arrivée d'air laminaire et silencieuse se dirigeant vers le palais ; une configuration en chuchotement causée par

une rotation des aryténoïdes produit un flux bruyant, rapide et compact se dirigeant vers la langue, la pression dans la bouche étant relativement basse. Ces modifications de configuration parviennent à influencer le mélange d'air entrant dans la fente entre l'anche et le bec. L'air venant du palais est calme et amortit les harmoniques aigus ; l'air provenant de la langue passe sur l'anche, ce qui lui donne une agitation favorisant les harmoniques aigus, d'autant plus que le passage de l'air bruyant provoque une excitation de l'anche. La vitesse des deux boucles buccales modifie la pression régnant au niveau de la fente entre l'anche et le bec, comme elles constituent en quelque sorte une pompe à vide. Un phénomène analogue a lieu dans l'arrière gorge. Il est très probable qu'une rétroaction se mette en place au niveau du larynx, comme celui-ci est constitué de tissus mous ; le pharynx en particulier pourrait agir comme une sorte de capteur pour synchroniser les vibrations de la colonne d'air avec celles du jet d'air provenant la glotte. J'en déduis que cette circulation de l'air modifie l'impédance du conduit vocal (ainsi que les paramètres d'embouchure et de pression dans la bouche) par rapport à la situation où l'air est quasi immobile. Il appartient aux physiciens d'en déterminer la cause (résonateur de Helmholtz, effet Doppler, pompe à vide, portance de l'anche, rétroactions sur la glotte et sur les jets d'air ?). Une excellente approche pédagogique de ces phénomènes de tuyauterie consiste à écouter le bruit produit par la mise en place dans le conduit vocal de ces différents bouclages juste avant le seuil d'oscillation. Elle est d'une efficacité redoutable pour corriger les problèmes d'émission ou pour apprendre à maîtriser certaines difficultés. L'influence du conduit vocal est nettement accrue si l'instrument est peu résonant, comme une clarinette historique par exemple. Tous les efforts entrepris au niveau pédagogique ou musical pour vérifier cette nouvelle conception n'ont permis que de la confirmer et ont même suscité la découverte de nouvelles techniques de son plus efficaces. Deux exemples pris au hasard parmi une longue série : une langue dressée devant la fente de l'anche permet de renforcer les harmoniques aigus et de monter plus haut dans le suraigu (en haussant l'intonation), en soumettant les bords de l'anche à un courant d'air plus rapide que le centre. Ceci explique l'efficacité du détaché avec le dessous de la langue dans le suraigu. Une langue plus ou moins large latéralement au niveau des canines et des prémolaires permet de modifier significativement la sonorité en influençant l'appel d'air en direction de l'anche.

Annexe I

Valorisation des compétences : un nouveau chapitre de la thèse

Pour faciliter l'insertion professionnelle de leurs doctorants, trois écoles doctorales en Sciences de l'Univers d'Ile de France et de Toulouse, en partenariat avec l'Institut National des Sciences de l'Univers du CNRS et l'Association Bernard Grégory (ABG), ont imaginé en 2000 le concept "Valorisation des compétences - un nouveau chapitre de la thèse". L'idée force est d'encourager les doctorants à préparer leur après-thèse en les aidant à faire le point sur les compétences et savoirs-faire professionnels développés au cours de la présentation de leur doctorat. Cette aide réside dans un encadrement extérieur au monde académique. En effet, des "mentors", qui sont des consultants spécialistes du recrutement formés par l'ABG à l'encadrement de cet exercice, les accompagnent et les guident dans cette démarche. Depuis la première expérience pilote , le nombre de doctorants participant à cet exercice ne cesse d'augmenter : alors qu'il y en avait 15 en 2000, il y en a 150 cette année.

C'est en entendant parler certains amis de cette expérience et en lisant les réactions de quelques doctorants ayant participé à la campagne 2002, que j'ai eu envie de m'inscire afin de réfléchir à ma thèse en tant qu'expérience professionnelle. Même si ce travail m'a pris beaucoup de temps et d'énergie, il s'est avéré très fructueux et enrichissant, tant sur le plan professionnel que personnel.

I.1 Cadre général et enjeux du projet

I.1.1 Objectifs du projet

Les musiciens reconnaissent unanimement qu'ils utilisent leur conduit vocal lorsqu'ils jouent. En revanche, son utilisation n'est pas très claire car tous les instrumentistes ne sont pas forcément capables de décrire précisément ce qu'ils font et pourquoi. D'autre part, les études scientifiques sont assez controversables : certains ont montré que le conduit vocal pouvait jouer

sur la hauteur et le timbre de la note jouée, d'autres ont en revanche réfuté cette théorie, considérant que la forte absorption des poumons inhibe la réflexion des ondes acoustiques dans le conduit respiratoire de sorte qu'il ne peut y avoir aucun effet de ce résonateur dans le jeu du musicien.

Le projet de ma thèse était donc précisément de mettre fin à la controverse et d'apporter des éléments de réponse et d'explication aux clarinettistes. Dans ce but, une série de mesures de la pression dans la bouche de clarinettistes en quasi situation de jeu a été réalisée sur une vingtaine de musiciens australiens afin de comprendre ce qui se passe acoustiquement. Ces mesures ont ensuite été corrélées aux enregistrements et à des mesures faites à l'aide d'une bouche artificielle. Cette thèse a donc été principalement expérimentale. Cependant, tous les résultats expérimentaux ont ensuite été interprétés à l'aide d'études théoriques ainsi que de simulations numériques.

I.1.2 Enjeux

Enjeux scientifiques et techniques

Le premier enjeu scientifique est bien évidemment la compréhension de l'utilisation du conduit vocal par les musiciens dans le jeu de la clarinette afin de mettre fin à la controverse existant à ce sujet dans la littérature scientifique.

Un autre enjeu scientifique, à plus long terme, est l'incorparation des effets subtils dû au conduit vocal dans les modèles de synthèse de la clarinette, voire des instruments à vent en général.

Sur un plan plus technique, la mise au point des dispositifs expérimentaux utilisés présentaient de réels défis techniques. Il a fallu adapter le banc de mesure d'impédance existant à l'UNSW au problème qui nous intéressait, avec tous les problèmes que cela engendrait : miniaturisation à l'échelle du bec de clarinette, fiabilité et reproductibilité des mesures, quasi situation de jeu des musiciens,... D'autre part, deux bouches artificielles ont été mises en place, à l'UNSW et à l'Ircam. Un certain nombre de nouveautés ont été ajoutées par rapport aux bouches déjà existantes dans d'autres laboratoires.

Enjeux de valorisation et de transfert

- Pour les clarinettistes, les résultats de cette thèse pourraient leur permettre de mieux comprendre ce qu'ils font avec leur conduit vocal, ce qui leur permettrait par conséquent de mieux enseigner ces paramètres de jeu à leurs élèves.
- Dans une logique plus marchande, une valorisation au niveau du Forum, le club des utilisateurs des logiciels Ircam, et des compositeurs est également envisageable à long terme avec l'intégration de ces résultats dans le logiciel de synthèse par modèles physiques conçu à l'Ircam (Modalys). Cependant, les enjeux financiers résultants seraient faibles,

le chiffre d'affaires de Modalys étant d'environ 13500 € par an. D'autre part, un projet, *Windset*, de création d'instruments virtuels vient d'être lancé entre la société Arturia et l'Ircam au sein de l'action Recherche et Innovation en Audiovisuel et Multimedia financée par le Ministère de la Recherche. Pour l'instant, le conduit vocal n'a pas été évoqué mais il s'avèrera peut-être nécéssaire de l'implémenter pour obtenir des instruments plus réalistes, en particulier dans le cas du saxophone.

I.2 Déroulement, gestion et coût du projet

I.2.1 Préparation et financement

Ayant réalisé mon stage de recherche de maîtrise au laboratoire de l'UNSW avec Joe Wolfe, j'avais très envie de renouveler l'expérience pour une durée un peu plus longue pour différentes raisons. La première était le laboratoire lui-même et bien sûr son directeur : Joe Wolfe est un encadrant extraordinaire, présent quand il le faut tout en laissant ses étudiants très libres, avec une passion très communicative pour la recherche et la musique. Son équipe est dynamique, ses techniciens sont très serviables et j'avais donc grande envie de retravailler avec eux. La deuxième raison est que je trouve important en recherche d'établir des collaborations de manière étroite et une thèse en cotutelle en est un bon moyen ! Enfin, la possession de l'anglais à un haut niveau est primordiale en sciences et donc passer au moins un an dans un pays anglophone s'avère nécessaire.

C'est pourquoi je suis partie à la recherche d'une équipe en France qui serait intéressée par une telle collaboration. René Caussé à l'Ircam a tout de suite été enchanté par une telle perspective et le projet s'est ensuite développé naturellement sachant qu'étant moi-même flûtiste, je voulais travailler sur les instruments à vent, et que d'autre part, il fallait un sujet qui s'inscrive dans une rélle coopération : l'Ircam s'est avéré intéressant pour la partie plus théorique, l'UNSW disposait quant à elle d'un bon dispositif de mesure d'impédance.

Finalement, lors d'une discussion de ce projet de thèse avec un de mes enseignants de DEA, Jean Kergomard, celui-ci s'est trouvé intéressé par le projet et a contribué fortement à son évolution puisque l'instrument d'étude est passé du hautbois à la clarinette. La collaboration s'est donc ainsi élargie à son équipe au LMA.

En sus, un travail de recherche de financements a été fait. J'ai donc dû valoriser ce projet dans le cadre de trois appels d'offre :

- l'allocation moniteur normalien (AMN)
- la bourse d'aide à la mobilité du ministère de la recherche dans le cadre d'une cotutelle de thèse, (bourse notée par la suite bourse MR, d'un montant de 5100 €)

– l' appel à projet de l'ambassade de France en Australie pour une coopération scientifique franco-australienne au sein de l'organisation FEAST (bourse notée bourse A, d'un montant de 4320 €)

Au cours de cette phase préparatoire, je pense avoir ainsi fait preuve de capacité à être force de proposition ainsi que de mobilisation des compétences et des ressources afin d'organiser un projet qui me tenait à coeur.

I.2.2 Etapes scientifiques du travail

La première étape fut tout d'abord de lister tous les points qu'il m'a fallu aborder et résoudre au cours de ma thèse, en fonction des problèmes soulevés ou non résolus par les études précédentes sur ce même sujet, ainsi que de définir les moyens d'investigation pour y parvenir. Dans cette étape, j'ai donc cherché et lu tous les articles, chapitres de livres et thèses rédigés sur le conduit vocal dans le jeu des instruments à vent en général ainsi que dans le domaine de la parole afin de dégager les lignes directrices de mon projet.

Une autre étape, plus longue, a consisté à comprendre théoriquement l'influence du conduit vocal du musicien. Cette étude s'est accompagnée de simulations numériques. Dans cette étape, j'ai élaboré quelques modèles et partiellement mis en place un outil numérique pour comparer les modèles aux simulations, simulations qui ont été elles-mêmes ensuite comparées aux valeurs expérimentales.

La troisième étape a consisté en la mise en place, à l'UNSW, du système de mesures de l'impédance du conduit vocal de clarinettistes en quasi situation de jeu. Le principe de mesure existait déjà à l'UNSW mais en revanche, j'ai dû réalisé toute l'adaptation à la situation qui nous intéressait. Cette étape a été une des plus intéressantes de ma thèse :

– je suis devenue "experte" en bricolage puisque j'ai réalisé tous les prototypes et les systèmes préliminaires moi-même
– j'ai dû faire preuve de rigueur, de beaucoup de persévérance et d'ingéniosité pour finalement arriver à un système fiable

Cette étape s'est terminée par une série de mesures sur une vingtaine de clarinettistes australiens, ce qui a été enrichissant aussi bien sur le plan relationnel que sur le plan scientifique.

La quatrième étape, elle-aussi expérimentale, a été la conception puis l'utilisation d'une bouche artificielle avec conduit vocal. J'avais réalisé moi-même une bouche artificielle à Sydney, pour la clarinette, mais le problème des fuites n'était pas complètement réglé et surtout elle ne présentait pas la multi-fonctionnalité souhaitée à l'Ircam, qui voudrait s'en servir à l'avenir pour d'autres instruments comme la trompette, le hautbois . . . , et qui voudrait pouvoir contrôler un certain nombre de paramètres comme la tension et la pression des lèvres, la position des dents, la configuraiton du conduit vocal . . . . Sa conception a été réalisée par Alain Terrier, d'après des plans de bouches déja existantes dans d'autres laboratoires et de celle que j'avais réalisée à Sydney. Mon travail a consisté à élaborer certains points du dispositif pour, au final, pouvoir

comparer les expériences aux simulations. Les points sur lesquels j'ai travaillé sont aussi bien l'ouverture des cordes vocales ou la configuration du conduit vocal, que la place des capteurs de pression et la mise en place de protocoles pour obtenir tous les paramètres importants (pression dans la bouche, pression dans la clarinette, caractéristiques de l'anche ...).

Enfin, la dernière étape est une étape de synthèse et de rédaction pour aboutir au document final !

I.2.3 Conduite du projet

La conduite de ce projet a certainement été rendue plus délicate par la répartition de ma thèse sur trois laboratoires. En effet, lors de ma première année de thèse, je passais une semaine par mois à Marseille ce qui m'obligeait à rattraper un certain nombres d'heures de cours, et en plus, j'avais une double charge d'enseignement afin de pouvoir être libre la deuxième année, et pouvoir ainsi partir un peu plus d'un an en Australie. D'autre part, les billets d'avion n'étant pas très flexibles, j'avais au moins deux dates butoir qui m'ont obligée à finir, respectivement en France puis en Australie, mes sous-projets. Ceci s'est avéré assez facile pour l'étude théorique que je menais en France mais bien plus difficile pour l'étude expérimentale réalisée à Sydney. Cependant, dans un projet à gérer sur trois ans, il est nécessaire d'avoir des contraintes temporelles au risque, sinon, de se laisser embarquer dans des projets auxquels on n'ose ou n'arrive pas à mettre un terme.

Une aide précieuse dans la gestion de mon travail m'a en fait été apportée par les différents séminaires réalisés à l'IRCAM et à l'UNSW ainsi que les présentations lors de congrès, puisqu'ils m'ont en effet obligée à mettre au clair mes idées (avec une contrainte de temps) afin d'être capable de présenter mon sujet à des non spécialistes.

En revanche, cette participation de trois laboratoires, et en particulier de trois directeurs de thèse, a été très fructueuse par rapport à la résolution des problèmes et aux baisses de motivations qui arrivent plus ou moins régulièrement en cours de thèse. En effet, chacun en apportant son point de vue et son soutien moral a pu m'aider à différents moments et différents niveaux. D'autre part, discuter avec ses collègues et d'autres amis doctorants permet aussi de se remotiver.

Considérant qu'un chercheur peut difficilement, à l'heure actuelle, travailler seul dans son coin, et n'étant de toute manière pas une solitaire, j'ai également conduit ce projet en tissant un réseau de contacts, aussi bien en France qu'à l'étranger, afin de profiter des expériences de chacun pour essayer de résoudre mes problèmes et faire avancer ma thèse.

Ces trois années de thèse m'ont aussi appris à travailler simultanément sur plusieurs projets. Il m'a en effet fallu coordonner les différentes activités que sont les expériences, les études

théoriques, la rédaction d'articles, de bilans réguliers et puis de la thèse elle-même, l'enseignement, la recherche de financements, ...et les Etats Généraux de la Recherche dans lesquels je ne pouvais que me sentir concernée puisqu'il s'agit en quelque sorte de mon avenir ! J'ai également appris, un peu à mes dépens, qu'il faut parfois savoir s'arrêter, de crainte de "creuser sans fond", et bien mesurer les risques lorsqu'on se met à approfondir tel ou tel point. Il me semble que c'est une question inhérente à la recherche : à quel degré de précision et d'investigation doit on arrêter un sous-projet pour passer à un autre ? Il faut en fait toujours définir, avec beaucoup de rigueur, ses objectifs, voire ses sous-objectifs.

Enfin, j'ai appris à gérer les baisses de motivation qui surviennent occasionnellement au cours d'une thèse grâce à ma passion pour cette spécialité qu'est l'acoustique musicale mais surtout grâce aux nombreuses personnes qui m'entourent, aussi bien sur le plan scientifique que sur un plan plus personnel.

I.2.4 Evaluation du coût du projet

Ma participation à ce projet constitue la principale ressource humaine même si j'ai bénéficié ponctuellement de l'aide des mes directeurs de thèse ainsi que des ingénieurs et techniciens des différentes équipes dans lesquelles j'ai travaillées.

Le budget total, d'environ 149000 €, est en grande partie imputable à la masse salariale (86%). Ceci s'explique par le fait que, mis à part des frais de déplacement plus élevés qu'en général car l'Australie est quand même à l'autre bout du monde, cette thèse n'a pas nécessité d'investissements lourds.

Poste	Détails	Montant
Salaires et charges	Doctorant, 36 mois Directeurs de thèse, 3 mois Ingénieurs et techniciens, 5 mois	127700 €
Infrastructure	Ircam, UNSW et LMA	10000 €
Investissement	Ordinateur, Ordinateur portable personnel capteurs, bouches artificielles	2600 €
Missions	Séjour en Australie Congrès et séminaire Déplacements à Marseille	8460 €
Consommable	becs de clarinette, anches, ...	100 €
Total		148860 €

TAB. I.1 – Dépenses associées au projet

Provenance	Montant
Ministère de la recherche	90960 €
UNSW	22350 €
Ircam	20600 €
CNRS	10310 €
Bourse Ambassade	4320 €
Ecole Normale Supérieure Lyon	90 €
SFA	30 €
Total	148860 €

Tab. I.2 – Recettes

I.3 Compétences, savoir-faire, qualités professionnelles et personnelles

Cette thèse constitue en premier lieu l'aboutissement de mon parcours étudiant, commencé à mon entrée à l'Ecole Normale Supérieure en 1997. Ce sont les courts stages de licence et de maîtrise puis celui du DEA qui m'ont en effet donné le goût à la recherche et incitée à faire une thèse, toujours dans le même domaine, celui pour lequel je me passionne depuis le baccalauréat, soit l'acoustique musicale. Dans ce domaine, je me suis en particulier spécialisée dans les instruments à vent, et surtout la clarinette.

Cependant, cette thèse constitue surtout une véritable expérience professionnelle qui m'a permis d'acquérir diverses compétences.

Je commencerai par les compétences obtenues par rapport au métier même de chercheur. Ce métier consistant à se poser des questions puis à trouver les meilleurs moyens pour y répondre, au moins partiellement, j'ai beaucoup appris tant sur le plan de l'ingénierie de projet que sur la gestion du projet. En effet, en ce qui concerne le montage du projet, je suis dorénavant capable d'organiser, de convaincre et de mobiliser un certain nombre de personnes pour arriver à définir et financer le projet. Quant au pilotage dudit projet, j'ai appris à gérer les délais, définir les différentes tâches, rassembler les connaissances ainsi que les compétences et faire face à certains écueils comme les baisses de motivation, les pertes d'objectifs réalistes, la mauvaise gestion du temps partagé . . .

Sur un plan plus scientifique et technique, la dualité expérimentation/modélisation théorique de ma thèse m'a permis de progresser sur deux plans. Au niveau de l'expérimentation j'ai gagné en rigueur et en persévérance pour arriver à des manipulations fiables et reproductibles. Je suis également devenue une "bonne bricoleuse" d'après Joe Wolfe car j'ai en effet réalisé beaucoup de petites expériences préliminaires moi-même. Au niveau de la modélisation, j'ai appris à faire la part des choses entre ce qu'on veut obtenir d'un modèle et la réalité !

Sur un plan que je qualifierais de plus social, j'ai appris à m'intégrer dans un environnement et à me l'approprier. J'ai en effet dû m'intégrer non seulement dans les différentes équipes avec lesquelles j'ai travaillé mais aussi dans la communauté d'acoustique musicale, ce que j'ai réussi aussi bien au travers de congrès que par communication téléphonique et électronique. Je me suis intégrée également dans un environnement plus large rassemblant des chercheurs d'horizons très différents, au cours des Etats Généraux de la Recherche, durant lequels j'ai joué un rôle actif au sein de l'atelier interlocal de synthèse de Paris-Centre sur le thème Recherche et Société.

Cette ouverture au niveau scientifique a été complétée par une ouverture sur le plan musical puisque j'ai été amenée à travailler avec différents clarinettistes, surtout en Australie, mais aussi en France, et par une ouverture sur le plan culturel puisque j'ai passé quatorze mois en Australie, ce qui m'a permis par la même occasion de parler l'anglais couramment.

Enfin, sur un plan personnel, en sus des compétences que je pense avoir déjà possédées avant ma thèse comme un bon relationnel, un esprit d'analyse et de synthèse et un dynamisme qui me permet de mobiliser des gens, je retiendrai trois compétences que j'ai particulièrement développées : la curiosité et l'envie de comprendre, l'autonomie et la persévérance. C'est en effet l'envie de découvrir de nouvelles choses et de comprendre certains phénomènes qui m'a conduite tout au long de cette thèse. L'autonomie a été acquise puisque j'étais la seule porteuse de ce projet de recherche, même si mes directeurs de thèse m'ont aidé aux moments clé. Et enfin, la thèse est une étape difficile, surtout la fin, et seule la persévérance permet d'aller au bout ! Sans oublier tout de même la passion pour cette discipline, sans laquelle je n'en serais pas à ce stade !

I.4 Résultats, impact de la thèse

Cette thèse a permis au final d'élaborer deux dispositifs expérimentaux qui pourront être utilisés dans la suite, en particulier la bouche artificielle, qui permettra l'étude de différents instruments à vent. Même si les simulations ne permettent pas de prédire totalement ce qui se passe en réalité, l'étude réalisée permet quand même de comprendre un peu mieux ce qui se passe acoustiquement dans le conduit respiratoire des clarinettistes.

D'autre part, cette expérience professionnelle s'est avérée, en ce qui me concerne personnellement, très riche en enseignements et en développement de nombreuses compétences, ce qui me stimule pour continuer dans ce domaine. J'ai en effet envie, au moins dans un premier temps, de continuer dans la recherche, si possible en acoustique musicale, et si possible dans le public. Ceci explique mon choix d'un poste d'attaché temporaire de recherche et d'enseignement à l'Université Paris 11, avec un projet sur le rayonnement acoustique de la voix, pour l'année 2004-2005.

Je n'exclue cependant nullement la recherche privée d'autant que certaines compétences

acquises comme l'organisation (définition, plannification, financement) et la gestion d'un projet me permettront d'appréhender sans grande difficulté un poste dans une entreprise.

Réflexion et synthèse effectuées avec l'aide gracieuse de Philippe Bertrand, consultant en marketing de l'innovation à ATEMA Conseil

Bibliographie

[1] A. Almeida, C. Vergez, R. Caussé et X. Rodet. Experimental research on double reed physical properties and its application to sound synthesis. Dans *Proc. SMAC*, volume 1, pp. 243–246, Stockholm, Sweden, 2003.

[2] R. Anfinson. *A cinefluorographic investigation of supralaryngeal adjustments in selected clarinet playing techniques*. Thèse de Doctorat, State University of Iowa, 1965.

[3] M. Atig. *Non-linéarités localisées*. Thèse de Doctorat, Université du Maine, Le Mans, France, 2003.

[4] M. Atig, J.P. Dalmont et J. Gilbert. Saturation mechanism in clarinet-like instruments, the effect of the localised nonlinear losses. *A paraître dans Applied Acoustics*.

[5] J. Backus. Vibration of the reed and the air column in the clarinet. *J. Acoust. Soc. Am.*, 33(6), 1961.

[6] J. Backus. Small vibration theory of the clarinet. *J. Acoust. Soc. Am.*, 35(3), 1963.

[7] J. Backus. Input impedance curves for the reed woodwind instruments. *J. Acoust. Soc. Am.*, 56(4), 1974.

[8] J. Backus. The effect of the player's vocal tract on woodwind instrument tone. *J. Acoust. Soc. Am.*, 78(1), 1985.

[9] HT. Bahnson, JF. Antaki et QC Beery. Acoustical and physical dynamics of the diatonic harmonica. *J. Acoust. Soc. Am.*, 103(4) :2134–2144, 1998.

[10] N. Bak et P. Domler. The relation between blowing pressure and blowing frequency in clarinet playing. *Acustica*, 63 :238–241, 1987.

[11] A. Benade. Air column, reed and player's windway interaction in musical instruments. Dans *Vocal Fold Physiology*, éd. par I.R. Titze et R.C. Scherer. The Denver Center for the Performing Arts, 1983.

[12] H. Bouasse. *Instruments à vent*. A. Blanchard, Paris, 1986.

[13] X. Boutillon et V. Gibiat. Evaluation of the acoustical stifnfness of saxophone reeds under playing conditions by using the reactive power approach. *J. Acoust. Soc. Am.*, 100(2) :1178–1189, 1996.

[14] Claripatch. `http://www.claripatch.com`.

[15] R. Caussé, J. Kergomard et X. Lurton. Input impedance of brass musical instruments. Comparison between experiment and numerical models. *J. Acoust. Soc. Am.*, 75 :241–254, 1984.

[16] P. Clinch, G. Troup et L. Harris. The importance of vocal tract resonance in clarinet and saxophone performance, a preliminary account. *Acustica*, 50, 1982.

[17] J.S. Cullen, J. Gilbert et D.M. Campbell. Brass intruments : linear stability analysis and experiments with an artificial mouth. *acta acustica*, 86(4) :704–724, 2000.

[18] J.P. Dalmont. Acoustic impedance measurements. Part I : A review; Part II : A new calibration method. *J. Sound and Vibration*, 243(3), 2001.

[19] J.P. Dalmont et A.M. Bruneau. Acoustic iimpedance measurement : plane-wave mode and first helico-mode contributions. *J. Acoust. Soc. Am.*, 91 :3026–3033, 1991.

[20] J.P. Dalmont, B. Gazengel, J. Gilbert et J. Kergomard. Some aspects of tuning and clean intonation in reed instruments. *Applied Acoustics*, 46 :19–60, 1995.

[21] J.P. Dalmont, C.J. Nederveen, S. Dubos, S. Ollivier, V. Meserette et E. te Sligte. Experimental determination of the equivalent circuit of a side hole : linear and non-linear behaviour. *Acustica - acta acustica*, 88 :567–575, 2002.

[22] M. Demoucron. Influence du conduit vocal du clarinettiste sur la fréquence de jeu. Thèse, DEA ATIAM, 2004.

[23] E. Ducasse. *Modélisation et simulation dans le domaine temporel d'instruments à vent à anche simple en situation de jeu : méthodes et modèles.* Thèse de Doctorat, Université du Maine, Le Mans, France, 2001.

[24] E. Ducasse. A physical model of a single-reed wind instrument, including actions of the player. *Computer Music Journal*, 27(1) :59–70, 2003.

[25] S. El-Masri, X. Pelorson, P. Saguet et P. Badin. Development of the transmission line matrix method in acoustics applications to higher modes in the vocal tract and other complex ducts. *Int. J. Numer. model*, 11 :133–151, 1998.

[26] S.J. Elliot et J.M. Bowsher. Regeneration in brass wind instruments. *J. Sound and Vibration*, 83(2), 1982.

[27] J. Epps, A. Dowd, J. Smith et J. Wolfe. Real time measurements of the vocal tract resonances during speech. Dans *ESCA, Eurospeech 97*, Rhodes, Greece, 1997.

[28] M.L. Facchinetti, X. Boutillon et A. Constantinescu. Numerical and experimental modal analysis of the reed and pipe of a clarinet. *J. Acoust. Soc. Am.*, 113(5) :2874–2883, 2003.

[29] G. Fant. *Acoustic Theory of Speech Production.* Mouton, Paris, The Hague, 1970.

[30] S. Farner. Harmbal. Computer program in C. `http://www.pvv.ntnu.no/~farner/pub/harmbal.html`.

[31] S. Farner, C. Vergez, J. Kergomard et A. Lizee. Contributions to harmonic balance calculations of periodic oscillations for self-sustained musical instruments with focus on single-reed instruments. *In preparation for J. Acoust. Soc. Am.*

[32] J. Flanagan. *Speech Analysis Synthesis and Perception.* Springer-Verlag, New York, 1972.

[33] N.H. Fletcher, L. Hollenberg, J. Smith et J. Wolfe. The didjeridu and the vocal tract. Dans *Proc. of the International Symposium on Musical Acoustics*, 2001.

[34] N.H. Fletcher et T.D. Rossing. *The Physics of Musical Instruments.* Springer-Verlag, New York, 1995.

[35] C. Fritz, S. Farner et J. Kergomard. Some aspects of the harmonic balance method applied to the clarinet. *Applied Acoustics*, 65 :1155–1180, 2004.

[36] L. Fuks et J. Sundberg. Blowing pressures in bassoon, clarinet, oboe and saxophone. *Acustica - acta acustica*, 85(2) :267–277, 1999.

[37] B. Gazengel. *Caractérisation objective de la qualité de justesse, de timbre et d'émission des instruments à vent à anche simple.* Thèse de Doctorat, Université du Maine, Le Mans, France, 1994.

[38] B. Gazengel, J. Gilbert et N. Amir. Time domain simulation of single reed wind instrument. From the measured input impedance to the synthesis signal. Where are the traps? *acta acustica*, 3(5) :445–471, 1995.

[39] V. Gibiat et F. Laloë. Acoustical impedance measurements by the two microphone three calibration (TMTC) method. *J. Acoust. Soc. Am.*, 88 :2533–2545, 1990.

[40] J. Gilbert. *Etude des instruments de musique à anche simple.* Thèse de Doctorat, Université du Maine, Le Mans, France, 1991.

[41] J. Gilbert, J.P. Dalmont et M. Atig. Influence of losses on the saturation mechanism of single reed instruments. Dans *Proc. Stockholm Musical Acoustics Conf.*, pp. 283–286, 2003.

[42] J. Gilbert, J. Kergomard et E. Ngoya. Calculation of the steady-state oscillations of a clarinet using the harmonic balance technique. *J. Acoust. Soc. Am.*, 86(1) :35–41, 1989.

[43] N. Grand, J. Gilbert et F. Laloe. Oscillation threshold of woodwind instruments. *Acustica*, 82 :137–151, 1996.

[44] P. Guillemain, J. Kergomard et T. Voinier. Real-time synthesis models of wind instruments based on physical models. Dans *Proc. SMAC*, pp. 389–392, Stockholm, Sweden, 2003.

[45] P. Harper, S. Kraman, H. Pasterkamp et G. Wodicka. An acoustic model of the respiratory tract. *IEEE Trans. Biomed. Eng.*, 48(5) :543–550, 2001.

[46] A. Hirschberg. Ch. 7. Aero-acoustics of wind instruments. Dans *Mechanics of Musical Instruments, Lecture notes CISM*, éd. par A. Hirschberg, J. Kergomard et G. Weinreich, pp. 291–369. Springer Verlag, 1995.

[47] A. Hirschberg, R.W.A. Van de Laar, J.P. Marrou-Maurrières et A.P.J. Wijnands. A quasi stationnary model of the air flow in the reed channel of single reed woodwind instruments. *Acustica*, 70 :146–154, 1990.

[48] A. Hirschberg, J. Gilbert, R.Msallam et A.P.J. Wijnands. Shockwaves in trombone. *J. Acoust. Soc. Am.*, 99 :1748–1754, 1996.

[49] A. Hirschberg, J. Gilbert, A.P.J. Wijnands et A.J.M. Houtsma. Non-linear behaviour of single-reed woodwind musical instruments. *NAG (Nederlands Akoestisch Genootschap*, 107(3) :31–43, 1991.

[50] P. Hoekje. *Intercomponent energy exchange and upstream/downstream symmetry in non-linear self-sustained oscillations of reed instruments.* Thèse de Doctorat, CaseWestern Reserve University, Cleveland, Ohio, 1986.

[51] K. Ishizaka, M. Matsudaira et T. Kaneko. Input acoustic-impedance measurement of the subglottal system. *J. Acoust. Soc. Am.*, 60(1), 1976.

[52] R. Johnston. Pitch control in harmonica playing. *Acoustics Australia*, 15(3), 1987.

[53] R. Johnston, P. Clinch et G. Troup. The role of the vocal tract resonance in woodwind instrument playing. Unpublished.

[54] R. Johnston, P. Clinch et G. Troup. The role of the vocal tract resonance in clarinet playing. *Acoustics Australia*, 14(3), 1986.

[55] W. Kausel. Bore reconstruction from acoustical input impedance ; equipment, signal processing, algorithms and prerequisites. Dans *Proc. International Symposium on Musical Acoustics*, pp. 373–378, Perugia, Italie, 2001.

[56] J. Kergomard. *Champ interne et champ externe des instruments à vent.* Thèse de Doctorat, Université Pierre et Marie Curie, Paris, 1981.

[57] J. Kergomard. Ch. 6. Elementary considerations on reed-instruments oscillations. Dans *Mechanics of Musical Instruments, Lecture notes CISM*, éd. par A. Hirschberg, J. Kergomard et G. Weinreich, pp. 229–290. Springer Verlag, 1995.

[58] J. Kergomard et J. Gilbert. Analyse de quelques aspects du rôle de l'anche d'un instrument à vent cylindrique. Dans *5e Congrès Français d'Acoustique, Lausanne*, pp. 294–297. Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, 2000. in French.

[59] J. Kergomard, S. Ollivier et J. Gilbert. Calculation of the spectrum of self-sustained oscillations using a variable truncation method : application to cylindrical reed instruments. *Acustica - acta acustica*, 86 :685–703, 2000.

[60] M. Kob. *Physical modelling of the singing voice.* Thèse de Doctorat, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, 2002.

[61] H. Levy. New directions for harmonica. Woodstock : Homespun Tapes, 1992. Commercial videotape.

[62] J. Marchi. *Etude des harmoniques et du suraigu de la clarinette.* Ed. Lemoine, Paris, 1994.

[63] A. Mayer. RIAM (Reed Instrument Artificial Mouth) : a computer controlled excitation device for reed instruments. Dans *Proc. SMAC*, volume 1, pp. 279–282, Stockholm, Sweden, 2003.

[64] C.S. McGinnis et C. Gallagher. The mode of vibration of clarinet reed. *J. Acoust. Soc. Am.*, 12 :529–531, 1941.

[65] X. Meynial. *Systèmes micro-intervalles pour les instruments de musique à vent avec trous latéraux et oscillations d'une anche simple à un résonateur de forme simple.* Thèse de Doctorat, Université du Maine, Le Mans, France, 1987.

[66] L. Millot. *Etude des instabilités des valves : application à l'harmonica diatonique.* Thèse de Doctorat, Université Paris 6, 1999.

[67] J. Mooney. *The effect of the oral cavity on the tone quality of the clarinet.* Thèse de Doctorat, Brigham Young University, 1968.

[68] B.C. Moore, B.R. Glasberg et M.J.Shailer. Frequency and intensity difference limens for harmonics within complex tones. *J. Acoust. Soc. Am.*, 75(2) :550–561, 1984.

[69] P.M. Morse et K.U. Ingard. *Theoretical acoustics.* Princeton University Press, 2000.

[70] R. Msallam, S. Dequidt, R. Caussé et S. Tassart. Physical model of the trombone including non-linear effetcs. application to the sound synthesis of loud tones. *acta acustica*, 86 :725–736, 2000.

[71] M.D. Susumu Mukai. Laryngeal movement while playing wind instruments. Dans *Proc. of the International Symposium on Musical Acoustics*, pp. 239–242, Tokyo, Japan, 1992.

[72] M. Nakhla et J. Vlach. A piecewise harmonic balance technique for determination of periodic response of nonlinear systems. *IEEE Trans. Circuit Theory*, 23(2) :85–91, 1976.

[73] C.J. Nederveen. *Acoustical aspects of woodwind instruments.* Fritz Knuf, Amsterdam, 1969. reprinted by Northern Illinois University Press, Dekalb, 1998.

[74] S. Ollivier. *Contribution à l'étude des oscillations des instruments à vent à anche simple.* Thèse de Doctorat, Université du Maine, Le Mans, France, 2002.

[75] S. Ollivier et J.P. Dalmont. Mise en évidence d'une non-linéarité localisée au niveau d'un trou latéral d'instrument à vent. Dans *Vème Congrès Français d'Acoustique*, pp. 345–348, Lausanne, 2000.

[76] F. Pinard, B. Laine et H. Vach. Musical quality assesment of clarinet reeds using optical holography. *J. Acoust. Soc. Am.*, 113(3) :1736–1742, 2003.

[77] R.L. Pratt, S.J. Elliot et J.M. Bowsher. The measurement of the acoustic impedance of brass instruments. *Acustica*, 78(1), 1985.

[78] W.H. Press et et al. *Numerical recipes in C : The art of scientific computing.* Cambridge University Press, 2nd édition, 1992.

[79] Resonans. Logiciel d'aide à la conception d'instruments à vent. *Laboratoire d'Acoustique de l'Université du Maine / IRCAM.*

[80] M.R. Schroeder. Determination of the geometry of the human vocal tract by acoustics measurements. *J. Acoust. Soc. Am.*, 41(4), 1967.

[81] R.T. Schumacher. Self sustained oscillations of the clarinet : an integral equation approach. *Acustica*, 40 :298–309, 1978.

[82] J.R. Smith, N. Henrich et J.Wolfe. The acoustic impedance of the boehm flute : standard and some non-standard fingerings. Dans *Proc. Inst. Acoustics*, volume 19, pp. 315–330, 1997.

[83] S. Sommerfeldt et W. Strong. Simulation of a player-clarinet system. *J. Acoust. Soc. Am.*, 83(5) :1908–1918, 1988.

[84] M.M. Sondhi. Model for wave propagation in a lossy vocal tract. *J. Acoust. Soc. Am.*, 51(6) :1070–1075, 1974.

[85] M.M. Sondhi. An improved vocal tract model. Dans *Proc. 11th Int Congr. Acoust.*, volume 4, pp. 167–170, Paris,France, 1983.

[86] M.M. Sondhi et J. Schroeter. A hybrid time-frequency domain articulatory speech synthesizer. *IEEE Trans. Acoust., Speech, Signal Processing*, 35 :955–967, 1987.

[87] D.W. Stauffer. *Intonation deficiencies of wind instruments in ensemble*. Washington : The Catholic University of America Press, 1954.

[88] S.E. Stewart et W.J. Strong. Fonctionnal model of a simplified clarinet. *J. Acoust. Soc. Am.*, 83(5) :1908–1918, 1980.

[89] B.H. Story, A.M Laukkanen et I.R. Titze. Acoustic impedance of an artificially lengthened and constricted vocal tract. *J. of Voice*, 14(4) :455–469, 2000.

[90] B.H Story, I.R. Titze et E.A. Hoffman. Vocal tract area functions from magnetic resonance imaging. *J. Acoust. Soc. Am.*, 100(1), 1996.

[91] S. Thompson. The effect of the reed resonance on woodwind tone production. *J. Acoust. Soc. Am.*, 66(5) :1299–1307, 1979.

[92] C. Vergez. *Trompette et trompettiste : un système dynamique non-linéaire à analyser, modéliser et simuler dans un contexte musical*. Thèse de Doctorat, Université Pierre et Marie Curie, Paris, 2000.

[93] C. Vilain, X. Pelorson, A. Hirschberg, L. Le Marrec, W. Opt'Root et J. Willems. Contribution to the physical modeling of the lips. influence of the mechanical boundary conditions. *Acustica - acta acustica*, 2003.

[94] T. Wilson. *The measured upstream impedance for clarinet performance and its role in sound production*. Thèse de Doctorat, University of Washington, 1996.

[95] T. Wilson et G. Beavers. Operating modes of the clarinet. *J. Acoust. Soc. Am.*, 56(2) :653–658, 1974.

[96] J. Wolfe. Clarinet acoustics. `http://www.phys.unsw.edu.au/music/clarinet`.

[97] W. Worman. *Self-sustained nonlinear oscillations of medium amplitude in clarinet-like systems*. Thèse de Doctorat, Case Western Reserve University, 1971.

Table des figures

Table des matières

Résumé

Cette thèse est consacrée à l'étude de l'influence du conduit vocal (CV) du clarinettiste sur des paramètres tels que la fréquence de jeu, le spectre harmonique et le seuil d'oscillation. Dans le modèle classique, seul le résonateur du corps de la clarinette est couplé non-linéairement au système excitateur qu'est l'anche. Ici, un autre résonateur est pris en compte, le CV, en série avec la clarinette.

Une série de mesures de l'impédance du CV, sur une vingtaine de clarinettistes australiens, en quasi situation de jeu, a permis de constituer une base de données pour les simulations numériques et de tirer quelques conclusions qualitatives. Ainsi, ces mesures montrent une grande variabilité entre les musiciens même s'ils respectent quasiment tous les deux principes suivants : l'impédance semble constante sur l'ensemble du registre (excepté le suraigu) en mode de jeu normal mais peut être radicalement différente pour des "effets spéciaux" comme le pitch bend ou des liaisons délicates.

Deux configurations très différentes (correspondant aux sons "i" et "ah") ont été choisies pour notre étude, à la fois numérique et expérimentale. La complexité du problème (équations différentielles non-linéaires couplées) ne permet pas, même en simplifiant à l'extrême, l'obtention d'une solution analytique simple. De plus, les simulations numériques ne conduisent à aucune corrélation entre une modification du CV et et l'effet sur le spectre et la fréquence de jeu. Des expériences ont ensuite été réalisées sur une bouche artificielle avec CV. Pression de seuil, fréquence de jeu, spectre et transitoires ont ainsi été mesurés. Les configurations "i" et "ah" ont été comparées pour différentes notes et transitions délicates. Les résultats présentent un faible accord avec les simulations numériques mais n'en sont pas moins intéressants. Dans le registre grave, l'enveloppe spectrale, mais pas la fréquence de jeu, dépend fortement du CV. La différence est plus importante pour les notes aiguës ou même l'émission varie de manière significative entre les deux configurations. Une configuration appropriée du CV peut également favoriser certaines notes et transitions (transitoires plus courts), en bon accord avec l'opinion des clarinettistes.

Mots clefs : acoustique musicale, clarinette, conduit vocal, fréquence de jeu, spectre harmonique, équilibrage harmonique.

Abstract

This thesis investigates acoustical features of the vocal tracts of clarinettists, and how these features influence the frequency of the note played, its spectrum and the mouth pressure required to initiate the note. In a widely used physical model of the clarinet, a single resonator (the clarinet) is coupled non-linearly to the control oscillator (the reed). In this study another resonator, the vocal tract (VT) is included. The acoustical impedances of the two resonators appear in series as a load on the reed.

Measurements were made of the impedance spectra of the VT of twenty Australian players under a range of conditions. These are analysed and compared, and are also used as a basis for numerical simulations. These measurements show a large variability among musicians but some general trends are observed. Most clarinettists vary the configuration of the VT relatively little over most of the range of the instrument, except for the altissimo register. They do however use radically different configurations for special effects such as pitch bend and awkward slurs across registers.

Two such very different configurations were chosen for theoretical, numerical and experimental simulations. They are described by clarinettists as 'ee' and 'aw'. The complexity of the problem (non-linear coupled differential equations) does not allow a simple analytical solution, even with many simplifications. Moreover, the numerical calculations did not yield any simple correlation between the change in the VT impedance and the effect on the spectrum and the playing frequency. Experiments were then conducted using a blowing machine with an artificial VT. Threshold pressures, playing frequencies, spectra and transition transients were measured. The configurations 'ee' and 'aw' were compared for notes in different registers and for the difficult slurs. They show poor agreement with the numerical calculations but interesting results. In the low register, the spectral envelope, but not the playing frequency depend strongly on the tract configuration. The difference is larger for high notes, where even the notes issued can be significantly different between the two configurations. An appropriate VT configuration can also make some notes start more easily (shorter transients) and facilitate slurs, in good agreement with the opinion of clarinettists.

Keywords : musical acoustics, clarinet, vocal tract, playing frequency, spectrum, harmonic balance.